



Digitales Wagenmeister-Assistenzsystem

## Individueller Schlussbericht

### SGKV e.V.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Verkehr

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



**Projektträgerschaft  
Innovative  
Hafentechnologien**

<b>Förderkennzeichen</b>	<b>Konsortium</b>
19H21002A	Duisburger Hafen AG
19H21002B	Nordic Rail Service GmbH
19H21002C	leogistics GmbH
19H21002D	Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr (SGKV) e.V.
19H21002E	Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik
<b>Verfasser:</b>	Jan-Christoph Maaß, Hans-Georg Christiansen, Franca Hiemisch, Jannis Greif, Marco Mohr, Thomas Toschka, Matthias Plehm, Jan Schlierf, Dr. Agnes Eiband, Volker Kraft

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	4
I. Kurze Darstellung zum Vorhaben.....	5
1 Aufgabenstellung.....	5
1.1 Hintergrund zum Projekt.....	5
1.2 Ziele des Projektes.....	5
1.3 Projektansatz.....	6
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	7
3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	7
4 Stand von Wissenschaft und Technik.....	8
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
II. Eingehende Darstellung zu.....	9
1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	9
1.1 AP 1 Anforderungs- und Prozessanalyse.....	9
Analyse der IST-Situation / Visualisierung der Prozessketten.....	9
Identifikation von Optimierungspotentialen und Zieldefinition.....	12
Identifikation rechtlicher Anforderungen.....	14
1.2 AP 2 Identifikation und Auswahl von Technologien zur Unterstützung der WTU.....	15
Identifikation und Dokumentation relevanter externer Datenquellen.....	15
Entwicklung eines potentiellen Maßnahmenkatalogs.....	19
Auswahl / Sondierung des Nutzungspotentials von Endgeräten zur Unterstützung der WTU ..	24
1.3 AP 3 Entwicklung einer Software zur Unterstützung der WTU.....	28
II.1.1 Technische Grundkonzeption / Design Systemarchitektur.....	28
Sprints.....	33
1.4 Hardware- und softwaretechnische Entwicklung zum Sensorik-Konzept.....	33
1.5 AP 4 Durchführung der Feldversuche.....	39
Planung der Feldversuchsphasen.....	39
Technische Einbindung / Anlernen der Wagenmeister.....	41
Test der Maßnahmen.....	43
1.6 AP 5 Validierung und Rekursion.....	52

1.6.1	Optimierung und Finalisierung Software .....	55
	Dokumentation wirtschaftlicher Effekte des Verkehrsträgers Schiene.....	56
1.7	AP 6 Projektmanagement und Kommunikation .....	57
1.8	Zusammenfassung und Ausblick .....	59
2	wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises (je Partner im eigenen Bericht).....	60
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	60
II.2	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans .....	60
4	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens während der Durchführung.....	61
5	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse .....	61
Anlagen.....		1
	Anlage 1 Prozessvisualisierung WTU .....	1
	Anlage 2 Steckbrief Dokumente und Daten .....	1

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ausschnitt aus dem Steckbrief zu Dokumenten und Daten. Der gesamte Steckbrief befindet sich in Anlage 2 .....	11
Abbildung 2: Ebenen der Unterstützung des Wagenmeisters (Wgm).....	12
Abbildung 3: Übersicht der möglichen Anbindungen als Eingangs- oder Ausgangssysteme und -datenquellen für ein Wgm-Assistenzsystem .....	18
Abbildung 4: Formen der Unterstützung des Wgm .....	19
Abbildung 5: Gestaltungsraum innerhalb des Projektes .....	21
Abbildung 6: Foto einer Flachstelle .....	24
Abbildung 7: Technik-Vergleich Mobile Endgeräte .....	25
Abbildung 8: WTU-App "Zug-Ebene" .....	29
Abbildung 9: WTU-App "Bremsprobe".....	30
Abbildung 10: WTU-App "Zug-Ebene" .....	30
Abbildung 11: WTU-App "Wagendetails" .....	30
Abbildung 12: WTU-App "Schaderfassung" .....	31
Abbildung 13: Datenbrille "Realware HMT-1" mit Beschriftung (durch leogistics) .....	32
Abbildung 14: Test der Datenbrille .....	42
Abbildung 15: Aufbau des 1. Prototyps – technischer Test .....	44
Abbildung 16: Frequenz-Grafiken der Aufnahmen von den Testfahrten mit und ohne Flachstellen (Beispiele) mit Luftschall und Körperschall .....	45
Abbildung 17: Technische Zeichnung der Schall-Sensorik-Box .....	46
Abbildung 18: Schall-Sensorik-Box Rückansicht mit Solarpanel .....	47
Abbildung 19: Schall-Sensorik-Box Vorderansicht mit Kontrollschrank.....	47
Abbildung 20: Blick auf den inneren Aufbau im Kontrollschrank der Schall-Sensorik-Box.....	48
Abbildung 21: Körperschallsensor von außen am Gleis mit Magnethaftung; Anbindung an die Schall-Sensorik-Box über Kabel.....	48
Abbildung 22: Beispielhafte Darstellung der Schallamplitude eines Zuges (mit Körperschallsensor erfasst).....	49
Abbildung 23: Beispielhafte Darstellung des Spektrogramms der Schallmessung eines Zuges (mit Körperschallsensor erfasst).....	49
Abbildung 24: Zwei Beispiele für Spektrogramm-Grafiken der Aufnahmen von Zügen mit Flachstellen .....	50
Abbildung 25: Kennzahlenbewertung der Projektziele.....	53

# I. Kurze Darstellung zum Vorhaben

## 1 Aufgabenstellung

Für das Projekt DIANA - Digitales Wagenmeister-Assistenzsystem haben sich die Duisburger Hafen AG, die leogistics GmbH; die Nordic Rail Service GmbH; die Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr (SGKV) e.V. und das Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik zusammengeschlossen. Die Duisburger Hafen AG hat die Rolle der Konsortialführung übernommen.

### 1.1 Hintergrund zum Projekt

Die deutschen See- und Binnenhäfen sind zentrale Knotenpunkte im nationalen und internationalen Güterverkehr. Ein entscheidender Prozess innerhalb dieser Logistikkreisläufe ist die sogenannte wagentechnische Untersuchung (WTU), bei der ein Wagenmeister jeden Zug vor seiner Abfahrt auf technische Mängel überprüft. Dieser Prozess ist gesetzlich vorgeschrieben und sicherheitsrelevant. Gleichzeitig stellt er jedoch in vielen Fällen ein Nadelöhr dar, da er zeitintensiv ist und häufig durch medienbruchbehaftete, manuelle Abläufe geprägt wird.

Die heutigen Herausforderungen im Bahngüterverkehr – wie steigender Kostendruck, Fachkräftemangel, zunehmende Digitalisierung und ambitionierte Klimaziele – erfordern eine Modernisierung bestehender Prozesse. Vor diesem Hintergrund wurde das Projekt DIANA – Digitales Wagenmeister-Assistenzsystem ins Leben gerufen. Ziel war es, ein digitales System zu entwickeln, das den Wagenmeister in seiner Arbeit gezielt unterstützt, gleichzeitig die Qualität und Geschwindigkeit der WTU verbessert und dadurch einen spürbaren Beitrag zur Effizienzsteigerung in den Hafenprozessen leistet.

Neben der reinen Digitalisierung der Prüfprozesse lag ein weiterer Fokus auf der verbesserten Vernetzung aller beteiligten Akteure, wie Terminalbetreiber, Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU), Lokführer und IT-Systeme wie dem Terminal Operating System (TOS). Die Einbindung innovativer Technologien – darunter mobile Endgeräte, Assisted Reality und Sensorik – war ein zentrales Element zur Umsetzung dieser Ziele.

### 1.2 Ziele des Projektes

Das Projekt DIANA verfolgte mehrere, eng miteinander verknüpfte Ziele, die sowohl auf die operative Prozessverbesserung als auch auf strukturelle Effekte für die deutsche Hafenlogistik abzielten.

Das übergeordnete Ziel war die Verkürzung der Dauer und Verbesserung der Qualität der wagentechnischen Untersuchung (WTU) in den Häfen. Dadurch sollte die Zugabfertigung beschleunigt, die Gleis- und Terminalkapazitäten besser genutzt und letztlich die gesamte Umschlagleistung gesteigert werden. Ergänzt wurde dieses Ziel durch folgende Teilziele:

- Zeitersparnis durch Digitalisierung: Durch die Ablösung papierbasierter Berichte und die Nutzung mobiler Anwendungen soll die WTU um rund 30 Minuten pro Zug verkürzt werden. Hochgerechnet auf bundesweit mehrere tausend tägliche Güterzüge ergibt sich daraus ein erheblicher Effizienzgewinn.
- Reduktion der Schadwagenquote: Mithilfe zusätzlicher Sensorik und verbesserter Eingangskontrollen sollen schadhafte Wagen frühzeitig erkannt und die Anzahl, der im Rahmen der WTU ausgeschiedenen Wagen um bis zu 90 % reduziert werden.
- Erhöhung der Prozesssicherheit: Die schrittweise, digital unterstützte Durchführung der WTU soll sicherstellen, dass alle Prüfschritte vollständig und nachvollziehbar dokumentiert werden – insbesondere bei neuen oder wechselnden Fachkräften.
- Nachhaltige Verkehrsverlagerung: Durch verbesserte Effizienz und Zuverlässigkeit des Schienengüterverkehrs leistet das Projekt einen Beitrag zur angestrebten Verlagerung von Verkehren von der Straße auf umweltfreundlichere Verkehrsträger wie Schiene und Wasserstraße.
- Stärkung der digitalen Infrastruktur: Die Entwicklung einer offen zugänglichen Plattformlösung schafft eine skalierbare und übertragbare IT-Infrastruktur, die auch anderen Häfen zugutekommt.

Zusammengefasst sollte DIANA zeigen, wie durch gezielte Digitalisierung und Prozessinnovation ein zentraler Ablauf der Hafenlogistik zukunftsfähig gestaltet werden kann – mit positiven Effekten für die Wirtschaft, die Umwelt und die Wettbewerbsfähigkeit des Standorts Deutschland.

### **1.3 Projektansatz**

Zur Umsetzung dieser Ziele verfolgte das Projekt DIANA einen interdisziplinären und praxisnahen Entwicklungsansatz, der mehrere technologische Innovationslinien miteinander kombinierte und konsequent auf die Bedürfnisse der Anwender – insbesondere der Wagenmeister – ausgerichtet war.

Im Zentrum des Projekts stand die Entwicklung einer modularen Softwarelösung für mobile Endgeräte (z. B. Tablets oder Datenbrillen), die den Wagenmeister bei der Durchführung der WTU unterstützt. Die Anwendung ermöglicht die strukturierte Erfassung von Prüfergebnissen, die mobile Erstellung und digitale Übermittlung von Schadprotokollen sowie die Echtzeit-Kommunikation mit anderen Akteuren entlang der Transportkette.

Ergänzend sollte eine IT-Infrastruktur auf Basis von Open-Source-Technologien konzipiert werden, die als Software-as-a-Service-Plattform (SaaS) aufgebaut ist. Diese erlaubt es auch anderen Hafenstandorten, die Lösung unabhängig zu nutzen und weiterzuentwickeln – bei gleichzeitig standardisierten Schnittstellen und Datenformaten für eine hohe Interoperabilität.

Ein weiterer Fokus lag auf der Integration externer Datenquellen und Sensorik. So wurde beispielsweise geprüft, inwiefern Daten aus Traingates, OCR-Systemen oder Kameras eingebunden werden können, um den Zustand von Wagen und Ladung bereits vor Beginn der WTU beurteilen zu können. Dies unterstützt die Fehlervermeidung bei der Beladung und ermöglicht eine priorisierte Prüfung auffälliger

Wagen. Der Projektverlauf war dabei agil organisiert, um flexibel auf Erkenntnisse aus Praxisphasen reagieren zu können. In mehreren Feldtests an den Standorten Duisburg und Lübeck wurden Software und Geräte unter realen Einsatzbedingungen erprobt, optimiert und weiterentwickelt. Das Feedback der Anwender wurde dabei systematisch einbezogen und floss direkt in die Weiterentwicklung der Lösung ein.

Durch diesen ganzheitlichen Ansatz konnte DIANA nicht nur technologische Innovationen hervorbringen, sondern auch konkrete Handlungsempfehlungen für eine zukunftsorientierte Digitalisierung der Hafenprozesse liefern.

## **2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Zu Projektbeginn lag bei den Praxispartnern **NRS** und **duisport rail** keine durchgängige digitale Lösung für die wagentechnische Untersuchung (WTU) vor; in der Praxis wurden heterogene, teils Excel-/PDF-basierte Formate und standortspezifische Systeme genutzt (u. a. **leoRail** bei NRS, **ZEDAS** und **3R-Cloud** bei duisport). Diese fragmentierte Ausgangslage unterstrich den Bedarf nach einer integrierten, anschlussfähigen Lösung. Auf dieser Basis brachte das **Fraunhofer IML** einschlägige Vorerfahrungen in **Sensorik** und **KI-gestützter Datenaufbereitung/-interpretation** ein und adressierte damit früh die Option, akustische Signale zur Schadwagendetektion zu nutzen und KI-fähige Auswertepfade vorzubereiten. **leogistics** konnte auf Vorarbeiten bei **NRS** aufbauen (Einbindung in **leoRail**) und lieferte die technische Grundkonzeption der WTU-App inklusive erster Schnittstellen- und Oberflächenspezifikation – ein wichtiger Beschleuniger für prototypische Integrationen. Die **SGKV** verantwortete methodisch die strukturierte **Prozessaufnahme** und koordinierte das Projekt; zugleich brachte sie ihr Netzwerk sowie Erfahrungen in **Standardisierung** ein, wobei sich die Daten- und Dokumentenlogik u. a. an der **DIN SPEC 91073** orientierte. Die Summe dieser Voraussetzungen – fehlende operative Lösung bei den Anwendern, gepaart mit technologischer, methodischer und standardbezogener Expertise im Konsortium – bildete die tragfähige Grundlage, um eine modulare, integrierbare und perspektivisch übertragbare Digitalunterstützung der WTU zu entwickeln.

## **3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Projekt DIANA wurde als mehrjähriges, anwendungsorientiertes Forschungsvorhaben konzipiert, das die Digitalisierung der wagentechnischen Untersuchung (WTU) im kombinierten Verkehr systematisch erproben und weiterentwickeln sollte. Die Planung sah eine enge Verzahnung von Prozessanalyse, Technologieentwicklung, praktischer Erprobung und fachlicher Evaluation vor. Ziel war es, sowohl technische als auch organisatorische Lösungen zu identifizieren, die eine spätere Übertragbarkeit in den regulären Betrieb ermöglichen.

Das Vorhaben gliederte sich in mehrere aufeinander abgestimmte Arbeitspakete (APs), die arbeitsteilig bearbeitet wurden. Dabei wurden sowohl spezifische Entwicklungsschritte (z. B. Softwareentwicklung, Sensorik) als auch querschnittliche Aufgaben (z. B. Prozessanalyse, Kommunikation, rechtliche

Bewertung) berücksichtigt. Die Koordination des Gesamtvorhabens lag bei der SGKV.

Die Projektlaufzeit erstreckte sich vom 01.01.2022 bis zum 30.06.2025, einschließlich einer kostenneutralen Verlängerung um sechs Monate, die aufgrund betrieblicher und organisatorischer Rahmenbedingungen notwendig wurde. Die Umsetzung folgte einem modularen Aufbau, der ausreichend Flexibilität für technische Validierungen und standortbezogene Anpassungen bot.

Im Folgenden werden die zentralen Phasen und inhaltlichen Schwerpunkte des Projektverlaufs skizziert. Eine detaillierte Darstellung einzelner Maßnahmen, Meilensteine und Ergebnisse erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln.

## **4 Stand von Wissenschaft und Technik**

Zum Projektbeginn lag im Bereich der wagentechnischen Untersuchung (WTU) kein durchgängiges digitales System vor, das mobile Endgeräte, externe Datenquellen und Schnittstellen zum Betrieb integriert. Bestehende Lösungen fokussierten meist Teilprozesse, etwa die digitale Erfassung von Schäden, und waren häufig unternehmensspezifisch oder manuell geprägt. Auch im Bereich der automatisierten Schadwagendetektion war der Stand der Technik durch Insellösungen mit begrenzter Datenbasis geprägt. Systeme zur akustischen, optischen oder thermischen Erkennung befanden sich teils im Pilotstatus, wurden aber bislang nicht systematisch mit operativen WTU-Prozessen verknüpft. Wissenschaftlich fehlten standardisierte Ansätze zur Integration solcher Technologien in die Prozesskette der WTU sowie zur Einbindung in Terminalsysteme. Das Projekt DIANA konnte hier durch die Entwicklung einer mobilen App, die Erprobung von Sensorik und die Analyse externer Datenquellen (z. B. RailWatch, ASE) einen innovativen Beitrag leisten.

## **5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Zusammenarbeit mit anderen Stellen erfolgte vor allem in der Abstimmung zum Stand der Technik und der Forschung. Zum Thema Sensorik wurden intensiv mit den Projekten ESPEK<sup>1</sup>, DIMI<sup>2</sup> oder SWIN<sup>3</sup> kooperiert sowie mit Technikanbietern wie Müller BBM. Des Weiteren erfolgten mehrere Workshops und Einzelgespräche zu Anbietern von Technik (z.B. Sensoren) und Daten (z.B: Railwatch, ASE) geführt. Dauerhafte Zusammenarbeit erfolgte bei der Integration der Technologien in die Prozesskette innerhalb der Häfen der Praxispartner. Hier war eine ständige Abstimmung mit angrenzenden Systemen der Praxispartner wichtig Z.B. die IT-Landschaft der übergeordneten Häfen oder die Abstimmung zum Zugang zu den Gleisen für die Feldversuche.

---

<sup>1</sup> TH Wildau (2025): Projektwebseite „ESPEK - Erkennung von Schadmustern an Personenverkehrszügen und Evaluierung der Konfidenz zur Auswahl robuster Features für „Predictive Maintenance“. Link: [ESPEK](#)

<sup>2</sup> Vgl. Fraunhofer IML (2025): Projektwebseite „Digital Inspection by Machine Intelligence“, Link: [DIMI](#)

<sup>3</sup> Vgl. Fraunhofer IML (2023): Projektwebseite „Smart Waggon Inspector“ im Rahmen des Silicon Economy Initiative. Dortmund, open source. Link: [Smart Waggon Inspector \(SWIn\) - Silicon Economy](#)

## **II. Eingehende Darstellung zu**

### **1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele**

#### **1.1 AP 1 Anforderungs- und Prozessanalyse**

##### Analyse der IST-Situation / Visualisierung der Prozessketten

###### **Problemstellung, Lösungsansatz und Ziel des AP 1.1**

Das Ziel dieses Arbeitspakets lag in der Aufnahme und Analyse WTU relevanter Teilprozesse der beiden Standorte, um anschließend Anforderungen an die Lösungen definieren zu können.

In dieser ersten Phase wurden die aktuellen Prozesse hafenübergreifend aufgenommen und die Optimierungsbedarfe ermittelt, die der Wagenmeister an die Funktionalität, Wirtschaftlichkeit und Einsetzbarkeit der technischen und organisatorischen Lösungen im Hafenbetrieb stellt.

###### **AP 1.1: Analyse der IST-Situation/ Visualisierung der Prozessketten**

Im Rahmen von AP1 wurden alle projektrelevanten Prozessschritte zur Durchführung der Wagentechnischen Untersuchung an den Standorten Duisburg und Lübeck, sowohl bei der Eingangskontrolle (des ankommenden Zuges) sowie bei der abschließenden WTU vor der Abfahrt identifiziert.

Im Rahmen der Prozessanalyse wurden ergänzend der Ressourceneinsatz – insbesondere in Bezug auf Zeitaufwand und eingesetztes technisches Equipment – sowie der Informationsfluss, einschließlich potenzieller Medienbrüche, an den Standorten Hafen Lübeck und Duisburger Hafen untersucht. Die Analyse diente darüber hinaus der Beschreibung von Zielsetzungen, Entwicklungen sowie der Erfassung der aktuellen Ist-Situation und bildete die Grundlage für die anschließende Identifikation von Optimierungspotenzialen.

Die relevanten Teilschritte im Aufgabenbereich des Wagenmeisters wurden systematisch erfasst und sowohl in der Prozessvisualisierung als auch, sofern erforderlich, in ergänzenden Steckbriefen dokumentiert. Die Steckbriefe dienten der gezielten Fokussierung auf zentrale Elemente der WTU, die für die nachfolgenden Arbeitsschritte von Relevanz waren. So wurde unter anderem ein Steckbrief zu den im Rahmen der WTU verwendeten Dokumenten und Daten erstellt. Ziel war es, die relevanten Dokumente im Verlauf der WTU zu identifizieren und darzustellen, welche spezifischen Dateninhalte auf den jeweiligen Dokumenten erforderlich sind. Die verschiedenen Steckbriefe wurden in strukturierter und vertiefter Form aufbereitet, um wesentliche Erkenntnisse über die Prozessvisualisierung hinaus

darzustellen. Unter anderem wurden Steckbriefe zu sämtlichen relevanten Dokumenten und Datenfeldern erstellt, die im Rahmen der WTU Anwendung finden.

Die Prozesse an beiden Standorten wurden darüber hinaus in Form von Prozessketten visualisiert, um eine transparente und nachvollziehbare Darstellung der bestehenden Abläufe zu gewährleisten. Der Einsatz von Prozessketten ermöglichte eine anschauliche und zugleich detaillierte Abbildung der Einzelschritte, auf deren Basis Verbesserungspotenziale identifiziert werden konnten. Der Vergleich der Prozessketten beider Standorte ermöglichte zudem die Identifikation standortspezifischer Unterschiede in der Durchführung der WTU sowie in den jeweiligen infrastrukturellen Rahmenbedingungen. Diese Erkenntnisse stellten eine wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung einer WTU-Softwarelösung dar.

### **Durchführung einer Eingangsuntersuchung**

Ein zentrales Ergebnis der Analyse ist der Haftungsübergang zwischen dem Vorbahnhof und dem Hafenstandort Duisburg. Es konnte festgestellt werden, dass der Vorbahnhof im Duisburger Hafen eine zentrale Rolle einnimmt, da an diesem Punkt die Übergabe der Verantwortung vom Strecken-Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) an das Rangier-EVU erfolgt. In diesem Zusammenhang geht auch die Haftung für etwaige Schäden an Güterwagen und Ladeeinheiten (LE) auf das Hafenbahnverkehrsunternehmen über.

Aus haftungsrechtlichen Gründen werden daher bereits im Vorbahnhof sogenannte Eingangsüberprüfungen der Wagen durchgeführt. Diese dienen der frühzeitigen Identifikation möglicher Schäden an den Güterwagen bereits vor Haftungsübergang. Obwohl dieser Schritt rechtlich nicht der eigentlichen WTU zuzuordnen ist, stellt er dennoch einen essenziellen Bestandteil der operativen Praxis dar.

Für die Konzeption der zu entwickelnden Softwarelösung kommt dem Vorbahnhof somit eine besondere Bedeutung zu, da hier bereits erste Daten erfasst und an nachgelagerte Prozesse übermittelt werden könnten. In diesem Kontext wurde auch der Einsatz sensorbasierter Technologien zur automatisierten Schadensdetektion im Rahmen der Eingangsüberprüfung als potenziell zweckmäßig und technisch sinnvoll erachtet.

### **Wagenliste als zentrales Datendokument**

Ein weiteres wichtiges Ergebnis der Durchgeführten Prozessanalyse ist die Relevanz der Wagenliste während der WTU. Die in der Wagenliste abgebildeten und erforderlichen Informationen bilden die Grundlage zur WTU der Wagenmeister.

## Steckbrief Dokumente und Daten

Ziel der Übersicht ist die Darstellung aller mit der WTU (ggf. inkl. Vorprüfung) verbundenen Informationen (Vollständigkeit wichtig!). Grundlage bilden (nicht einheitliche) Dokumente wie Wagenliste oder WTU-Protokoll. Zudem wird der erste digitale Ursprung der Infos im Rahmen des Transports aufgelistet. In einem weiteren Schritt sollen die wirklich notwendigen Infos für die einzelnen Prüfschritte festgelegt werden, um unnötige Infos zu eliminieren. Teilweise sind für den gleichen Prüfschritt unterschiedliche Dokumente mit nicht immer 100% gleichen Infos

Alle Dokumente sind als eigenständige Blätter in dieser Excel-Datei hinterlegt

Nr.	Dokument	Information	Fokus	einheitliches Format?	Ursprung der Info (initiale Digitalisierung)	Art der Übermittlung	Änderung der Info
WL1	Wagenliste	Datum Wagenliste	Zug		EVU Eingang		
WL2	Wagenliste	Uhrzeit Wagenliste	Zug		EVU Eingang		
WL3	Wagenliste	Zugnummer	Zug	ja	EVU Eingang		
WL4	Wagenliste	Name 1 Triebfahrzeugführer/in (Tf)	Zug		EVU Eingang		
WL5	Wagenliste	Name 2 Triebfahrzeugführer/in (Tf)	Zug		EVU Eingang		
WL6	Wagenliste	LüP	Triebfahrzeug		EVU Eingang		
WL7	Wagenliste	V-max (in Kmh)	Triebfahrzeug		EVU Eingang		
WL8	Wagenliste	Ladungsgewicht (to) insg.	Zug		EVU Eingang		
WL9	Wagenliste	Wagongewicht (to) insg.	Zug		EVU Eingang		
WL10	Wagenliste	Gesamtgewicht (to)	Zug		EVU Eingang		
WL11	Wagenliste	Bremsgewicht P (to)	Zug		EVU Eingang		
WL12	Wagenliste	Bremsgewicht G (to)	Zug		EVU Eingang		
WL13	Wagenliste	Handbremse Stck (Anzahl insg.)	Zug		EVU Eingang		

Abbildung 1: Ausschnitt aus dem Steckbrief zu Dokumenten und Daten. Der gesamte Steckbrief befindet sich in Anlage 2

Die Wagenliste wird vorab vom EVU versendet und während der WTU mit neuen Informationen aufbereitet, wie beispielsweise geänderter Wagenreihung als Folge einer Schadwagenaussetzung. Im Rahmen der Analyse wurde daher identifiziert, an welchen Prozessschritten die Wagenliste mit welchen Informationen benötigt und ggf. verändert wird. Die Wagenliste wird hierbei zunächst handschriftlich in Notizform verändert und während der Erstellung des Prüfberichts erneut digital. Hieraus ergibt sich der Lösungsansatz, die Wagenliste in digitaler Form mitzuführen, um die Informationen und Änderungen lediglich einmalig einzugeben.

Aus der Prozessanalyse ging klar hervor, dass die Wagenliste das zentrale Dokument ist. Sowohl als Informationsträger, als auch als eines der Ausgabedateien durchläuft das Dokument die einzelnen Prozessschritte. Daher liegt bei der Konzeption und Implementierung der App ein besonderer Fokus auf der Wagenliste.

### Erstellung des Prüfberichts

Während der Prozessaufnahme wurde ein besonderer Fokus auf die Prüfberichterstellung gelegt, da hier vorab sehr großes Optimierungspotenzial vermutet wurde. Diese Vermutung hat sich auf vielfältige Weise bestätigt. Dazu gehören die Vielzahl an Medienbrüchen, die erheblich zur Ressourcenverschwendung beitragen. Insbesondere der Umgang mit Dokumenten, verbunden mit dem teilweisen Ausdrucken von Wagenlisten, handschriftlichen Notizen am Zug, nachträglichem Abtippen in Excel / Word, erneutem Ausdrucken, handschriftlichem Unterschreiben, Einscannen und wiederum Verschicken per E-Mail an unterschiedliche Empfänger, ist nicht mehr zeitgemäß. Digitalisierte Prozesse, wie zum einen die Einführung von einheitlichen Dokumentenformaten, z. B. für Wagenlisten, Schadprotokollen etc., die direkt in die Software geladen werden, aber auch der Versand des Prüfberichts direkt am Zug an vordefinierte Empfänger, würden für eine erhebliche Beschleunigung des Gesamtprozesses und damit für eine schnellere Zugfreigabe an das EVU sorgen. So könnte z. B. über passwortgeschützte Benutzerkonten auf eine händische Unterschrift verzichtet werden.

### Erhebung der IST-Kennzahlen für Schäden und des Zeitbedarfs relevanter Prozessschritte

Als Grundlage für eine spätere Evaluation der Optimierungsmaßnahmen, sowie des Projekterfolgs wurde darüber hinaus mit der Erhebung relevanter Kennzahlen zur Zugprüfung begonnen. Diese beinhalten u. a. die für relevante Einzelprozessschritte sowie den Gesamtprozess durchschnittlich

benötigte Zeit und den Anteil der Wagen, die durch die WTU gefallen sind. Hierfür wurde zudem mit der Erhebung der durchschnittlich benötigten Zeit zum Austausch des bemängelten Wagens begonnen. Weitere relevante Kennzahlen werden bei Bedarf ergänzt. Mit der Erhebung der Kennzahlen wurde bewusst abgewartet, bis die Zieldefinition sowie Optimierungspotenziale (AP 1.2) ausgearbeitet wurden, um den Erfolg von Maßnahmen in diesem Bereich besser bewerten zu können. Die Erhebung wurde im Dezember 2022 begonnen und im Januar 2023 abgeschlossen.

## Identifikation von Optimierungspotentialen und Zieldefinition

Neben den gradlinig aus der Prozessanalyse abzuleitenden Ansätzen für Optimierungen und zur Unterstützung der Wagenmeister ergaben sich, auch unter Einbeziehung der Sichten und Einschätzungen der Wagenmeister, weitere mögliche Optimierungspotenziale.

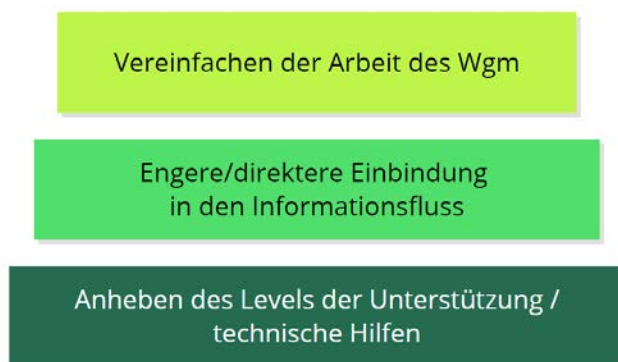


Abbildung 2: Ebenen der Unterstützung des Wagenmeisters (Wgm)

Für eine systematische Betrachtung der Unterstützungsmöglichkeiten und der daraus abzuleitenden Maßnahmen wurde eine Einordnung in drei Ebenen eingeführt (s. Abbildung 2).

Die grundlegendste Ebene umfasst direkte Ansätze, Technologien und Anwendungen, um den Wagenmeister in seiner täglichen Arbeit zu unterstützen und das Niveau der Unterstützung anzuheben. Dies kann beispielsweise eine technische Unterstützung durch aufgaben- und prozessadäquate technische Mittel (z.B. Tablets, Datenbrillen) sein. In der Ebene darüber wird auf eine aktivere Einbindung des Wagenmeisters in den Informationsfluss – durch passende Informationssysteme, Sensorik und zusätzliche, externe Informationsquellen - abgezielt. Dies soll prinzipiell zu jedem Zeitpunkt der WTU und möglichst in Echtzeit geschehen. Die oberste Ebene beinhaltet diejenigen Lösungen und Maßnahmen, die zum Vereinfachen der Arbeit des Wagenmeisters dienen. Dies soll durch passende Datenaufbereitung und -interpretation und das Ableiten von Empfehlungen und ähnlichem passieren.

Basierend auf der Prozesssicht einerseits und der informationstechnischen Sicht andererseits wurden mögliche Optimierungspotenziale herausgearbeitet. Ihre Wirkung wurde anhand quantitativer und qualitativer Kennzeichen definiert. Die quantitativen Kennzeichen bildeten in Teilen die Grundlage für die Erfassung des Status Quo durch duiSport und NRS zur späteren Beurteilung der Wirkung von Maßnahmen und technischen Mitteln.

Die entwickelten Optimierungspotenziale waren folgende:

1. Zeitersparnis zum Ist-Zustand bei der WTU für den Wagenmeister im Standardfall, d.h. einer WTU ohne nennenswerte Auffälligkeiten
2. Zeitersparnis zum Ist-Zustand bei der WTU für den Wagenmeister im Störfall, d.h. bei einer WTU mit Konsequenzen wie dem Aussetzen von Schadwagen
3. Anteil vorab erkannter Schadwagen; Idee ist hier, durch eine frühzeitige Identifikation zu einer Reduktion der Anzahl der auszurangierenden Wagen bei der WTU zu kommen
4. Qualitätsgewinn durch einen besseren, im Sinne von schnellerem, früherem, und/oder genauerem Informationsfluss zu Folgenutzern
5. Qualitätsgewinn für den Arbeitsplatz des Wagenmeisters – zur Akzeptanzsteigerung und Nachwuchsgewinnung
6. Genauere und schnellere Störungsursachen-Erkennung
7. Einfacheres "Erlernen" der Aufgaben des Wagenmeisters
8. Herausstellen unberechtigter Schadensansprüche von Dritten, um diese klären bzw. abweisen zu können, und zwar mit guter Begründungsbasis

Die fünf erstgenannten waren, als Ergebnis einer Analyse sowie Bewertung im Rahmen eines Projektworkshops die zentralen Potenziale. Dabei wurde auch herausgestellt, dass jedes zu erschließende Potenzial selbstverständlich unter dem Einfluss von Investitions- und laufenden Kosten steht und dies seinen finalen Nutzen bestimmt.

Aus den Erkenntnissen zu den möglichen Optimierungspotenzialen und der dahinterstehenden Einflussfaktoren und den grundsätzlichen Anforderungen und Unterstützungsmöglichkeiten, aber auch aus den initialen Annahmen aus dem Projektantrag, wurden die Zieldefinitionen abgeleitet, die als Leitlinie für die informations- und softwaretechnischen Entwicklungen verwendet wurden.

Allgemeingültig und übergeordnet stehen zum einen die Reduzierung bestimmter Prozesszeiten, hier insbesondere der durchschnittlich benötigten Zeit zwischen fertiger Beladung und Zugausgang, und zum anderen eine engere und digitale Einbindung des Wagenmeisters mit relevanten Akteuren wie dem Terminal zur besseren Kommunikation und für eine zeitnahe digitale Datenweitergabe – bestenfalls zeitnah während der laufenden WTU.

Im Speziellen steht die Nutzung innovativer mobiler Ein- und Ausgabegeräte für diese Zwecke und die bessere und direktere Nutzung von Informationen aus dem TOS oder anderen Quellen für die WTU. Insbesondere die Zeit zwischen dem Start der WTU und dem Versand des Prüfberichts soll reduziert werden.

Im Zuge des Erreichens der gesteckten Ziele sollen am Ende ein höherer Automatisierungsgrad bei der Detektion von Schäden und eine geringere Schadwagenquote stehen.

## Identifikation rechtlicher Anforderungen

Ziel dieses Teilarbeitspakets war die systematische Aufbereitung der rechtlichen Anforderungen, um eine belastbare Rechtsgrundlage für die Entwicklung der angestrebten Lösung zu schaffen.

Im Rahmen des Projekts DIANA wurde frühzeitig geprüft, welche rechtlichen Rahmenbedingungen bei der digitalen Unterstützung der WTU zu beachten sind. Dabei standen insbesondere die Allgemeinen Vertragsbedingungen für die Verwendung von Güterwagen (AVV) sowie Vorgaben des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) im Fokus. Die Analyse ergab, dass eine Digitalisierung der WTU grundsätzlich mit den geltenden Vorschriften vereinbar ist, sofern die Verantwortung für die Durchführung der Prüfung weiterhin eindeutig beim Wagenmeister verbleibt. Die digitale Lösung darf demnach ausschließlich unterstützend wirken – eine vollständige Automatisierung oder Delegation der Prüfverantwortung war nicht vorgesehen und rechtlich nicht zulässig.

Vor diesem Hintergrund wurde zunächst auf eine detaillierte juristische Begleitung verzichtet, um den Fokus auf die funktionale und organisatorische Entwicklung zu legen. Sobald konkrete Softwarebausteine und Prüfprozesse ausgearbeitet waren, erfolgte eine erneute Prüfung ihrer Vereinbarkeit mit den einschlägigen Regelwerken.

Die WTU muss auf Grundlage des AVV-Schadenskatalogs durchgeführt werden, um eine einheitliche, nachvollziehbare und rechtssichere Bewertung des technischen Zustands von Güterwagen zu gewährleisten. Der Allgemeine Vertrag für die Verwendung von Güterwagen (AVV) ist ein international anerkanntes Regelwerk, das die Nutzung von Güterwagen durch Eisenbahnverkehrsunternehmen im europäischen Schienengüterverkehr regelt. Neben der Festlegung von Rechten und Pflichten zwischen Wagenhaltern und EVUs beinhalten die AVV insbesondere auch Vorgaben zur Instandhaltung, zur Verantwortungszuordnung im Schadensfall sowie zur Behandlung von Mängeln. Der zugehörige AVV-Schadenskatalog klassifiziert typische Schäden an Güterwagen in verschiedene Kategorien, die jeweils konkrete Handlungsanweisungen auslösen – beispielsweise Weiterfahrt unter Auflagen, sofortige Instandsetzung oder Ausmusterung. Die Anwendung dieses Katalogs ist essenziell für die sachgerechte Durchführung der WTU.

Ein besonderer Schwerpunkt lag auf der rechtssicheren Dokumentation der Prüfergebnisse, insbesondere im Hinblick auf Haftungssachverhalte und die Nachvollziehbarkeit durch Dritte. Auch der Informationsaustausch zwischen den Akteuren (z. B. Wagenmeister, EVU, Terminalbetreiber) wurde im Hinblick auf Datenhoheit und -schutz betrachtet.

Am Standort Duisburg wurde zudem der Übergang der Verantwortung zwischen Vorbahnhof und Terminalbetrieb thematisiert. Dieser Bereich stellte sich als besonders sensibel dar, da hier unterschiedliche betriebliche Zuständigkeiten und rechtliche Schnittstellen zusammentreffen. Die Notwendigkeit einer klaren, zeitnahen und belegbaren Datenweitergabe wurde im Projekt als besonders relevant erkannt.

Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr (SGKV) e.V.

Im Rahmen des Projekts übernahm die SGKV zentrale Aufgaben zur Erfassung und Analyse der bestehenden Prozesse im Bereich der wagentechnischen Untersuchung. Dazu zählten die Organisation und Koordination der Prozessaufnahme an den relevanten Standorten sowie die inhaltliche und visuelle Aufbereitung der Prozessvisualisierungen. Auf Basis der erhobenen Informationen wurden in einem weiteren Schritt aussagekräftige Steckbriefe erstellt, welche die wesentlichen Teilschritte, genutzten Dokumente und Schnittstellen im Prozess strukturiert und vertiefend darstellen. Diese Arbeiten bildeten die Grundlage für die Identifikation von Optimierungspotenzialen sowie für die spätere Anforderungsdefinition an die digitale Lösung.

## **1.2 AP 2 Identifikation und Auswahl von Technologien zur Unterstützung der WTU**

Im Anschluss an die Arbeiten zur Anforderungs- und Prozessanalyse in AP 1, die unter Kapitel 1.1 beschrieben sind, erfolgte die Analyse (Identifikation und Dokumentation) externer Datenquellen, welche die Prozessschritte der WTU tangieren. Des Weiteren wurde ein Maßnahmenkatalog für eine digitale Unterstützung der WTU erstellt sowie eine Auswahl geeigneter Technik (mobile Endgeräte, Sensorik) im ersten Schritt und eine Sondierung bezüglich des Nutzungspotentials dieser im zweiten Schritt durchgeführt. Diese Arbeiten sind nachfolgend beschrieben.

### **Identifikation und Dokumentation relevanter externer Datenquellen**

Allein durch die Zahl der Beteiligten in den Prozessketten, die entweder in die WTU eingebunden sind oder von ihr abhängen, legte schon zu Beginn des Projektes nahe, dass potenziell eine Vielzahl sinnvoller Daten vorhanden wäre – sofern die Bereitschaft und die Fähigkeit zum Teilen über Schnittstellen vorhanden sind. Demzufolge wurde in Verbindung mit der Prozessanalyse ein besonderes Augenmerk darauf gerichtet, die Punkte in der Prozesskette zu identifizieren, an den Partner bzw. allgemein Beteiligte aus ihren umgebenden Systemen Daten liefern könnten. Bzw. andersherum (direkt) nutzen könnten. Neben der an die Prozessanalyse gekoppelten Bestandaufnahme wurden darauf aufbauend – als Einstiegspunkt zu diesem AP 2.1 – die möglichen externen Datenquellen sowie Datengeber und Datennehmer untersucht.

Dies beinhaltete folgende Systeme, die aus der Blickrichtung der Wagenmeister eingehende Daten darstellen:

- **Datenplattform oder -drehscheibe (als Public Cloud)**  
Eine zentrale Plattform, die den Austausch von Daten zwischen verschiedenen Systemen und Akteuren ermöglicht und dabei typischerweise auf Cloud-Technologie setzt.
- **Terminal-Operating-Systeme (TOS)**  
Software, die die Abläufe in Umschlagterminals steuert, einschließlich der Planung und Verwaltung der handzuhabenden Container, Trailer und Wechselbrücken sowie der Fahrzeuge und des Terminalequipments.

- **Kranmanagementsysteme**  
Terminal-bezogene Systeme, die den Einsatz der Kräne in den Terminals planen und optimieren, um Effizienz und Sicherheit während der Kranoperationen zu gewährleisten.
- **EVU-Systeme**  
Systeme, die speziell für Eisenbahnverkehrsunternehmen entwickelt wurden, um u.a. Betriebsabläufe, Fahrpläne und den Kundenservice zu managen.
- **EIU-Systeme**  
Software- und Hardwarelösungen, die Eisenbahninfrastrukturunternehmen bei der Verwaltung und Überwachung der Infrastruktur unterstützen, vor allem auch der Gleise, der Weichen und der Signalanlagen.
- **Rail-Gates**  
Physische Lesetore, die zur automatisierten Erfassung von Fahrzeugdaten an Ein- und Ausfahrten von Terminals oder Bahnhöfen eingesetzt werden.
- **RailWatch**  
Spezifisches Kontrollsystem, das zur Überwachung an Bahnstrecken eingesetzt wird und mittels Sensoren und Kamertechnologie Daten zu Bewegungen von Zügen bzw. Wagen und deren Zuständen erhebt und analysiert, um Sicherheitsrisiken frühzeitig zu erkennen und betriebliche Effizienz zu erhöhen.
- **Datenbanken mit Fahrplandaten und Verspätungsinformationen**  
Systeme, die aktuelle und historische Informationen über Fahrpläne und Verspätungen von Zügen erfassen und bereitstellen.
- **Datenbanken mit Wageninformationen**  
Dezierte Datenbanken, die detaillierte Informationen über verschiedene Wagentypen enthalten, einschließlich ihrer Eigenschaften und technischen Details.

Während bei den TOS und den Kranmanagementsystemen sowie den Informationsdatenbanken Die Aufnahme anbieteroffen erfolgte, wurden in die Betrachtung der Datenplattform und der Lesetore immer auch der spezifischen Gegebenheiten bei Duisport respektive Duisport Rail einbezogen. RailWatch stellt per se ein in dieser Form einmaliges System dar. Mittlerweile, und damit anders als zum Zeitpunkt der Gespräche, die im Kontext dieses Projektes mit dem Anbieter geführt wurden, gehört RailWatch zum Konzern Vossloh.

Die fokussierten Informationssysteme waren in der Betrachtung im Projekt aufgrund der damit verbundenen, für den Wagenmeister relevanten Daten die Bahndispositionssysteme, das TOS und die Systeme der EVU. Allerdings, dies sei an dieser Stelle schon einmal vorweggenommen, stellt gerade die Anbindung an die TOS eine Hürde in den Informationsflüssen dar.

Ausgangsseitig sind die nachfolgend genannten Systeme als Empfänger von Daten relevant, die direkt oder indirekt aus der WTU entstehen können:

- **Datenplattform oder -drehscheibe**  
*Wurde bereits für die Eingangsseite eingeführt.*
- **Terminal-Operating-Systeme (TOS):** Neben der internen Verwaltung von Abläufen liefern TOS auch wichtige Daten über Containerbewegungen und Terminalstatus an externe Partner und Systeme.
- **EVU-Systeme:** Systeme der Eisenbahnverkehrsunternehmen, die Fahrplandaten, Verspätungsinformationen und andere betriebliche Daten an externe Akteure wie Fahrgäste und Logistikpartner übermitteln.
- **Bahninformations- und Dispositionssysteme:** Diese Systeme kommunizieren relevante Betriebsdaten, wie Fahrpläne und Dispositionsinformationen, an Beteiligte in der Transport- und Logistikkette.
- **Hafeninformationssysteme:** Diese Systeme bieten ausgehende Daten über Hafenaktivitäten, Schiffsbewegungen und Infrastrukturstatus an externe Nutzer, um die Effizienz im Hafenbetrieb

Von der grundsätzlichen Betrachtung her steht also bereits heute eine breite Palette an Systemen und Datenquellen in Form von Datenbanken zur Verfügung, die relevante und nützliche Daten für ein Wagenmeisterassistenzsystem liefern können. Und im Umkehrschluss Daten als Ergebnis der WTU an Teile dieser Systeme zurückreichen können.

Eine zentrale Erkenntnis war, dass im Rahmen DIANA zwar eine idealtypische Daten- und Schnittstellenwelt für die Lösungen für die WTU beschrieben werden kann, in der Realität zunächst aber jedwede Daten in jedwedem Format (vor allem Excel-basierte) genutzt werden müssen. Allein Wagenlisten liegen EVU-spezifisch in verschiedensten Excel- oder PDF-Formaten vor.

In der konkreten projektspezifischen Sicht waren die unternehmens- bzw. standortspezifischen Systeme der operativen Projektpartner, d.h. bei Duisport das zu dem Zeitpunkt aktuelle Bahnmanagementsystem ZEDAS und die übergeordnete Speicher-Cloud 3R-Cloud und bei NRS das Bahnmanagementsystem leoRail und das dortige Hafeninformationssystem im Einsatz und damit in der Betrachtung.

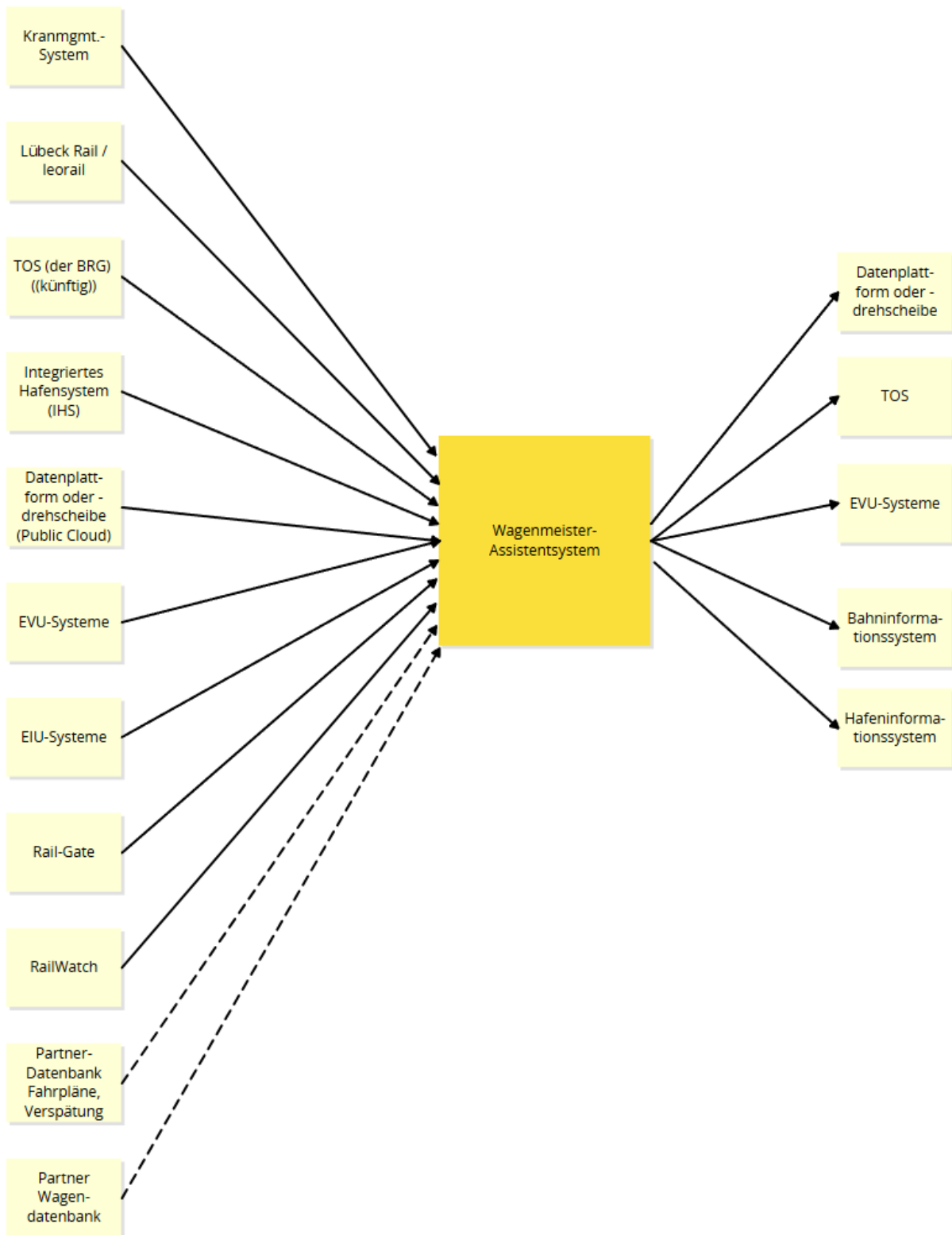


Abbildung 3: Übersicht der möglichen Anbindungen als Eingangs- oder Ausgangssysteme und -datenquellen für ein Wgm-Assistenzsystem

Die Voraussetzungen zur Anbindung bzw. Nutzung dieser Systeme und Datenquellen sind unterschiedlich. Eine Datenplattform oder -drehscheibe wäre als technologieoffene Integrationsplattform per se ein idealer Sammel- und Anknüpfungspunkt für eine Vielzahl der genannten Systeme. Allerdings werden derartige Ansätze bislang eher als Solitär verfolgt und auf relevante Partner

und der Systeme fokussiert. So hat duisport mit seiner Public Cloud eine entsprechende Lösung initiiert und bereitgestellt, allerdings konnte bislang noch keine umfassende Durchdringung erreicht werden. EVU stellen über ihre Systeme elementare Daten wie Wagenlisten zur Verfügung. Hier fehlen derzeit aber noch Standards zur systematischen Datenbereitstellung. Bei anderen Systemen steht eine Nutzbarkeit von Daten für ein Wagenmeisterassistenzsystem unter dem Vorbehalt des Kosten-Nutzen-Verhältnisses. So können Rail-Gates, die in der Regel als Investition lokaler EIU installiert werden, viele relevante Daten für die WTU erfassen. Allerdings rechtfertigt erst eine breite Nutzung von Daten dieser Rail-Gates im jeweiligen Eisenbahnprozess ein Investieren und Aufstellen. Über RailWatch werden verschiedene Grund- und mögliche Störungsdaten bei der Vorbeifahrt auf der Strecke erfasst. Diese müssen üblicherweise aber im Paket ohne Möglichkeit zur Überprüfung des individuellen Nutzens abgenommen und bezahlt werden. Die genannten Beispiele zeigen, dass die Anbindung relevanter Datengeber abseits der technischen Voraussetzungen von etlichen Rahmenbedingungen geprägt ist.

### Entwicklung eines potentiellen Maßnahmenkatalogs

Die in den gegebenen bzw. zukünftigen Prozesse (AP1.1) vorgefundenen bzw. abgeleiteten Optimierungspotenziale sowie die in AP1.2 eingeführten Betrachtungsebenen der Unterstützung des Wagenmeisters dienen in diesem Arbeitspakets ein Einstiegspunkt zur Entwicklung der Maßnahmen, die zur Unterstützung der Wagenmeister angegangen werden sollten.

Die höchste Unterstützungsebene, die sich auf die Arbeitsunterstützung durch Datenaufbereitung, -interpretation und Empfehlungen konzentriert.

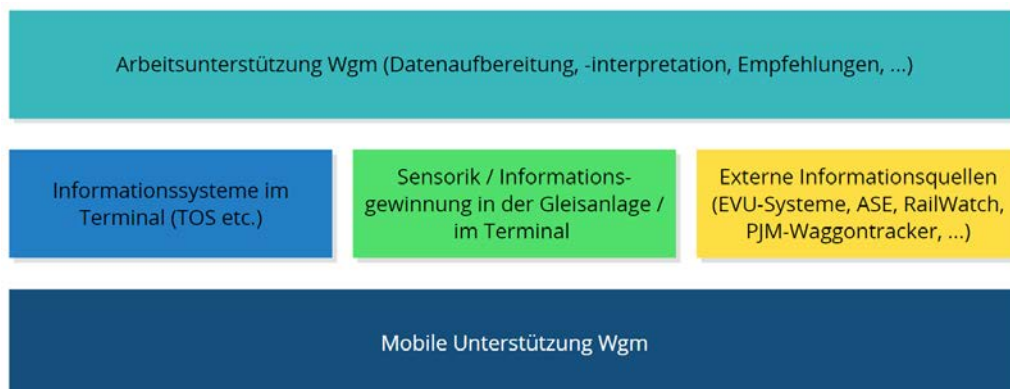


Abbildung 4: Formen der Unterstützung des Wgm

Zu den genannten drei Ebenen der Unterstützung wurden verschiedene Formen der Unterstützung der Wagenmeister herausgearbeitet (Abbildung 4).

Innerhalb der Ebene „Anheben des Levels der Unterstützung“ werden sämtliche mobilen (technischen) Geräte und Softwarekomponenten zusammengefasst, die in direkter Weise eine Hilfestellung bei der oder generell Vereinfachen der Arbeit der Wagenmeister darstellen. Hier werden verschiedene Arten der mobilen Unterstützung subsumiert. Durch die Bereitstellung von Informationen und Tools auf mobilen Geräten kann der Wagenmeister flexibler und reaktionsschneller agieren und wird befähigt,

auch während der WTU auf wichtige Daten zuzugreifen und damit Entscheidungen zeitnah treffen bzw. weitertragen zu können. Ziel der Ansätze der Ebene „Mobile Unterstützung“ ist es, die Effizienz und die Qualität der Arbeit des Wagenmeisters zu erhöhen.

Auf der mittleren Ebene stehen die unterschiedlichen Ansätze im Vordergrund, die den Wagenmeistern eine engere bzw. direktere Einbindung in den gesamten Informationsfluss bieten können. Hierzu gehören verschiedene Informationssysteme, die rund um die Terminals, wie z.B. TOS (Terminal Operating System), zugänglich sind. Ergänzend kommen neue Daten aus Sensorik, die entlang der Gleisanlagen oder im Terminal installiert wird, die dann für die Wagenmeister aufbereitet und bereitgestellt werden. Darüber hinaus ist auch das Einbeziehen bestehender externer Informationsquellen, wie EVU-Systeme, RailGates, z.B. von ASE, RailWatch-Messeinrichtungen oder der PJM-Waggotracker, eine Ergänzung, um den Wagenmeistern weitere nützliche Informationen für die WTU bieten zu können.

Zur weiteren Vereinfachung der Arbeit des Wagenmeisters sind auf der obersten Stufe verschiedene Methoden und Tools angedacht, die Arbeitsunterstützung durch Datenaufbereitung und -interpretation sowie Vorschläge und Hinweise rund um den Arbeitsalltag des Wagenmeisters zu liefern. Durch die Bereitstellung derartiger Informationen wird der Wagenmeister in die Lage versetzt, informierte Entscheidungen zu treffen und seine Arbeit effektiver zu gestalten.

Die dargestellte Systematik rund um die Unterstützungsmöglichkeiten für ein umfassendes und alle relevanten Beteiligten einbeziehendes strukturiertes Unterstützungssystem für den Wagenmeister bildete innerhalb des Projektes DIANA die Basis für die identifizierten Optimierungsansätze und Maßnahmen. Diese werden im Weiteren genauer betrachtet.

Folgende fünf Optimierungspotenziale wurden in der Analyse als zentral und daher als diejenigen, die über entsprechende Maßnahmen angegangen werden sollten, eingestuft (s.a. Kapitel 1.1.2):

- Zeitersparnis zum IST bei der WTU für Wagenmeister im Standardfall
- Zeitersparnis zum IST bei der WTU für Wagenmeister im Störfall (Schaden mit Implikation Aussetzen eines Wagens)
- Anteil vorab erkannter Schadwagen (= Reduktion der Anzahl der auszurangierenden Wagen bei WTU)
- Qualitätsgewinn im Informationsfluss zu Folgenutzern – Informationen schneller, früher, und in genauerer Form bereitstellen
- Qualitätsgewinn für den „Arbeitsplatz Wagenmeister“

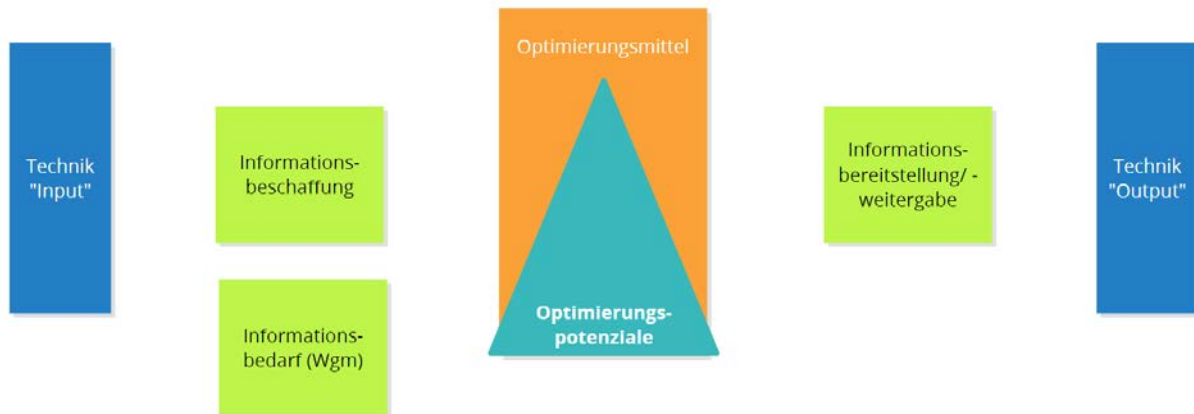


Abbildung 5: Gestaltungsraum innerhalb des Projektes

Von den Optimierungspotenzialen ausgehend leitete sich der in Abbildung 4 schematisch dargestellte Gestaltungsraum ab. Bestimmte Maßnahmen, wie das Bereitstellen von bestimmten Daten und Dokumenten wie z.B. Wagenliste und Ladeliste und das zielgerichtete Weitergeben der Ein- und Angaben der Wagenmeister in aufbereiteter Form, wurden seinerzeit und im Kontext des Gestaltungsraums als notwendig erachtet. Andere, wie das Erproben und Erschließen neuer Quellen, z.B. über akustische Erfassung, und das Interpretieren der dort gewonnenen Daten zum Nutzen der Wagenmeister wurden als wünschenswert eingestuft. Zusammenfassend wurden die Maßnahmen als erfolversprechendste eingestuft, die zum einen im Zusammenhang mit den Abläufen beim Auftreten von Schadensfällen an Wagen entstehen, insbesondere, wenn das Aussetzen von Wagen erforderlich ist. Und zum anderen diejenigen, die eine ortsunabhängige und zeitnahe Übermittlung von Informationen zur WTU oder genauer aus der Weitergabe der Dokumente daraus resultieren.

Zentrale Bewertungskriterien für die Maßnahmen stellten die Akzeptanz der Nutzenden, das Kosten-Nutzen-Verhältnis und die Prozessvereinfachung dar. Bezüglich des Kosten-Nutzen-Verhältnisses wurde aus Diskussionen und Analysen deutlich, dass nicht jede Information, die prinzipiell für die WTU hilfreich sein könnte, den Aufwand und die Kosten ihrer Generierung rechtfertigt.

Optimierungsmittel, d.h. Mittel zum Heben der Optimierungspotenziale, gemäß Gestaltungsraum wurden unter den Hauptthemenfeldern „Digitalisierung“ und „Entscheidungsunterstützung / KI“ eingruppiert. Hinzu kamen parallele Entwicklungen, die als möglicherweise einflussgebend für DIANA eingestuft wurden. Unter „Digitalisierung“ wurden folgende Ansätze zugeordnet und diskutiert:

- Zusammenführen von unterschiedlichen Informationssystemen, Datenquellen und Dokumenten
- Dokumente (Wagenliste, Ladeliste) digital bereitstellen (inkl. mobilem Ändern)
- Schadprotokoll 2.0: vorbereitet (vorab befüllt) - digital am Zug erstellt (als Option)
- Bessere Daten zu den Wagen und deren Zustand (u.a. über Sensorik)
- Digitalisierung und Automatisierung des Berichtswesens (z.B. Prüfbericht vorbereiten) sowie
- die Digitale Signatur als Nebenaspekt

„Entscheidungsunterstützung / KI“ umfasste im Zuge der Maßnahmenentwicklung Folgendes:

- Ausweisen von Wagen mit besonderem Prüf-Augenmerk (potenzielle Schäden)
- Schadensabschätzung und -beurteilung
- Automatisiertes Erstellen von Dokumenten (Schadprotokoll)
- Automatisiertes zielgerichtetes Verbreiten von Daten bzw. Informationen, d.h. ohne explizite Veranlassung des Wagenmeisters bei einem Standardprozess

Die als beeinflussend gesehenen Themen waren vor allem Digitale Automatische Kupplung – mit der noch offenen Frage, welche Schritte sie ersparen kann, ein „Intelligenter Wagen“ mit eigener Sensorik und eigenständiger Bremsüberwachung oder die neutrale, gesicherte Bereitstellung von (sensiblen) Daten über einen Datenraum oder eine Datenplattform, bei dem bzw. der die Bedingungen der Datenweitergabe festgelegt werden können.

Zu den ausgeführten Optimierungsmittel wurden die möglichen und geeigneten Formen der Informationsbeschaffung einerseits und der Informationsbereitstellung andererseits erörtert.

Bei der Eingangsseite, also der Informationsbeschaffung, sind generell alle Schnittstellen zu Systemen wie TOS, EVU-Systemen, Kranmanagementsystemen etc., aber auch zu dezidierten Datenbanken für Wagendaten oder Fahrplaninformationen, relevant. Des Weiteren zählen hierzu

- "externe", d.h. von Dritten kommerziell betriebene, Sensorik, z.B. Railwatch, und
- „interne“ Sensorik, d.h. im Rahmen von DIANA aufgebaute – und hier im Speziellen das später umgesetzte System zur akustischen Eingangsprüfung – oder bei Projektpartnern vorhandene Technologie wie RailGates bei Duisport.

Auf der Ausgangsseite, der Informationsbereitstellung, spielen weniger Systeme als Aspekte wie die Form der Darstellung, die konkreten Möglichkeiten der Assistenz und Entscheidungsunterstützung sowie die Art und Weise des Erfassens und Weitergebens der während der WTU vom Wagenmeister gesammelten Daten eine Rolle bei der Erörterung und Maßnahmenplanung.

Bevor im Kontext des AP 2.3, das in Kapitel 1.2.3 genauer beschrieben ist, der Fokus auf die Analyse und Festlegung konkreter Endgeräte zur Unterstützung der WTU gerichtet wurde, wurden in diesem Arbeitspaket unter Einbeziehung der unterschiedlichen Beteiligten und ihrer Sichten und Anforderungen die möglichen technischen Mittel und Medien sowie Systeme untersucht. Dabei wurde auch betrachtet, ob aus dem Blickwinkel „Informationsbeschaffung“ für den Wagenmeister andere Mittel, Geräte oder Systeme hilfreich oder notwendig sind, als dies bezüglich einer Informationsbereitstellung der Fall wäre.

Die Bandbreite der technischen Mittel und Medien sowie Systeme für die Informationsbeschaffung wurde – entsprechend den oben dargestellten Formen – folgendermaßen aufgespannt: Kranmanagementsysteme, EVU-Systeme, akustische Sensorik, optische Sensorik, RailGates, RailWatch als dezidiertes System, TOS, Wagentelematik, Datenbank für Wagendaten sowie Datenbank für Fahrplaninformationen und Verspätungen. Dabei wurden systemseitig TOS und Kranmanagementsysteme und bei der Sensorik akustische Verfahren. Am kritischsten wurden – aufgrund ihres Reifegrads und ihrer Zugänglichkeit – Ansätze im Kontext von Wagentelematik und das System RailWatch – aufgrund der Abhängigkeiten bei der Datenbereitstellung und den Kosten – als für die Unterstützung des Wagenmeisters zu nutzende Ansätze gesehen.

Technischen Mittel und Medien sowie Systeme, die in der Analyse als geeignet für die Informationsbereitstellung eingestuft wurden, waren allen voran etablierte Mobile Systeme wie Smartphones oder Tablets. Spezialisierte Formen wie zweckbezogene MDE oder Laser-gestützte Wagenmeisterassistenzsysteme wurden, bezogen auf MDE, als unnötig oder (im Außeneinsatz im Gleis) als unpraktikabel eingestuft. Datenbrillen wurden in den erweiterten Betrachtungsraum für Endgeräte aufgenommen, näheres findet sich in Kapitel 1.2.3. Bei der Weitergabe von Informationen steht vor allem das jeweilige TOS und die Systeme der EVU im Fokus.

Unabhängig von konkreten Endgeräteformen wurden Augmented Reality als Querschnittsthema für sämtliche Endgeräte ausgemacht. Perspektivisch bietet sich eine interaktivere Art der Unterstützung der Wagenmeister an.

Die akustische Sensorik war auch deshalb ein wenig vor optischen Ansätzen angesiedelt, da dies mit der Idee verbunden wurde, mit einfacheren und kostenseitig überschaubareren Mittel Unterstützungsmöglichkeiten für die Wagenmeister zu schaffen. Generell ist mit einfachen Sensoriklösungen das Bestreben verbunden, elementare Indikatoren für Schäden schnell und effizient beschaffen zu können. Konkret bedeutete dies auch, nicht konkurrierende Entwicklungen zu bestehenden Systemen wie RailWatch, den RailGates von ASE oder dem Schallmesssystem von Müller BBM im Rahmen von DIANA anstoßen zu wollen.

Ein Wagenmeister ist verpflichtet, jeden Bahnwagen auf Flachstellen und Aufschweißungen zu prüfen und ggf. den Waggon auszusetzen, wenn die Flachstelle eine gewisse Größe erreicht hat, die zu sicherheitsrelevanten Problemen führen kann. Erfahrene Wagenmeister können die typischen Schlaggeräusche erkennen, die eine Flachstelle oder eine Aufschweißung während der Fahrt erzeugt. Eine Sensorerfassung dieser Geräusche kann dem Wagenmeister hier frühzeitig Hinweise zu starken Flachstellen der einkommenden Züge geben, was seine Arbeit und die Folgekosten von nicht erkannten Flachstellen minimiert.

Grundlegend liegt hier der Fokus auf dem Aufwand, der entsteht, wenn ein Wagenmeister erst am Ende des Umschlagsprozesse bei der WTU einen Schadwagen identifiziert, der ausrangiert werden muss vor der Abfahrt des Zuges. Wenn Schäden bei der Einfahrt detektiert werden, können die Folgemaßnahmen direkt eingeleitet werden, bevor der Schadwagen wieder neu beladen wird. Hier sind Zeiten von bis zu 2 h als Schaden zu erwarten. Diese Verzögerungen haben oftmals zur Folge, dass nachgelagerte Prozesse ebenfalls beeinträchtigt werden und auch folgenden Züge nur verspätet abfahren können. Somit hat nicht selten der Austausch eines Schadwagens an Zug A auch negative Auswirkungen auf Zug B (und u.U. weitere Züge).

Sollte ein Wagenmeister bei der WTU den Schadwagen nicht entdeckt haben, wird das Unternehmen, das den Wagen übernommen hat, dem Verursacher die dadurch entstandenen Kosten in Rechnung stellen gemäß dem AVV. Eine Sensorik kann an dieser Stelle zweifach unterstützen. Zum einen verhindert die Sensorik, dass der Wagenmeister eine Stelle übersieht und zum anderen kann dokumentiert werden, wenn die betroffenen Wagen bereits bei der Einfahrt den Schaden aufwiesen. Damit kann ein Betrag in Höhe von 3.000-10.000 € an unberechtigten Forderungen abgewiesen werden.



Abbildung 6: Foto einer Flachstelle<sup>4</sup>

Allerdings gilt ein Wagen erst ab einer gewissen Größe der Flachstelle als Schadwagen. Die Messung obliegt hier dem Wagenmeister: Bei einem Rad mit einem Durchmesser größer als 630 mm, darf die Flachstelle eine Länge von unter 60 mm aufweisen. Ist der Raddurchmesser kleiner als 630 mm, ist nur eine Länge von 30 mm zulässig. Allgemein sind Wagen mit begrenzten Unrundheiten von mehr als 1 mm auszusetzen, unabhängig davon, ob es sich um Flachstellen oder um Materialauftragungen handelt.

Es werden bereits Verfahren zur Flachstellendetektion mit Hilfe von Schallerfassung angeboten. Allerdings können diese nicht innerhalb eines Werksgeländes eingesetzt werden, da sie eine Mindestgeschwindigkeit von 30 km/h voraussetzen. In einem Werksgelände ist jedoch die Geschwindigkeit generell auf max. 25 km/h zugelassen.

Diese Anforderungen flossen in die Entwicklung ein. Zur Unterstützung der Wagenmeister wurde daher das Konzept der Flachstellendetektion auf dem Werksgelände bei unter 25 km/h durch eine möglichst einfache Sensorik im Gleis entwickelt und getestet. Die Auswahl der Sensoren ist in Kapitel 1.2.3 zu finden.

## Auswahl / Sondierung des Nutzungspotentials von Endgeräten zur Unterstützung der WTU

Ausgehend von den Erkenntnissen und Erfahrungen aus den Prozessanalyse sowie basierend auf den identifizierten Optimierungspotenzialen (AP 1.2 / Kapitel 1.1.2) und den im Kontext von AP 2.2 (Kapitel 1.2.2) geführten Diskussionen und Voranalysen wurde das Spektrum möglicher Technologien untersucht, die als Basis für die mobile Lösung für den Wagenmeister fungieren können. D.h. potenzielle technische Lösungen zur Unterstützung der Wagenmeister wurden recherchiert und bewertet.

### **Mobile Endgeräte**

In Bezug auf die mobilen Endgeräte, die ein direktes Interaktionsmedium für den Wagenmeister für die alltägliche Nutzung darstellen und zu seiner Unterstützung dienen, wurden sowohl klassische Formen

---

<sup>4</sup> Bild: Oberstromanzeige - Eigenes Werk, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=73837673>

wie Smartphones und Tablets als auch einfache Datenbrillen und Augmented Reality-Glasses oder Laser-gestützte Darstellungssysteme betrachtet. Aufgrund der Umgebungsbedingungen und der Informationen, die dem Wagenmeister bereitgestellt werden sollten, wurde der Fokus bei der Entwicklung im Projekt auf Smartphones und Tablets gelegt. Allerdings wurden einfache Datenbrillen als Option weiter mitbetrachtet. Die anderen Technologien blieben aufgrund der Einsatzbedingungen außen vor. Die Hintergründe sind weiter unten dargelegt (s.a. Abbildung 7).

Typus "Mobile Endgeräte"	Charakteristika / Vor- und Nachteile								
	Zuverlässigkeit	Kostengünstige Anschaffung	Bedienfreundlichkeit	"Hände frei"	Augmented Reality	Informationsmenge	Rundumblick im Gleis möglich	Ermüdungsfreie Anwendung	Robustheit Außeneinsatz (Stoß-, Temperatur-, Feuchtigkeitsresistent)
Tablet	●	●	●	○	●	●	●	●	●
Smartphone	●	●	●	○	●	●	●	●	●
Daten-/Mixed Reality-Brille	●	●	●	●	●	●	●	●	●
MDE	●	●	●	○	○	●	●	●	●
Lasergestützt	●	○	●	●	○	●	●	●	●
Papier (IST)	●	●	●	○	○	●	●	●	●

Abbildung 7: Technik-Vergleich Mobile Endgeräte

Für die Entscheidung über die konkreten Geräte und Hersteller für die mobile Systemlösung wurden dann Aspekte wie die Schutzklasse und Umwelteinsatzbedingungen, die Einsatztemperatur, die Kameratechnologie oder die Bedienbarkeit unter schwierigen äußeren Bedingungen als entscheidende Kriterien zu Grunde gelegt. Aber auch die Art sowie der Umfang der darzustellenden Informationen und die Zweckdienlichkeit für die Abwicklung der physischen WTU wurden berücksichtigt.

In Bezug auf die Smartphones bzw. Tablets als mobile Geräte wurde ein technologie- und anbieterunabhängiger Ansatz verfolgt, allein die Ausrichtung auf Geräte mit dem Betriebssystem Android wurde als Voraussetzung festgelegt. Einige Typen von diesbezüglichen Endgeräten wurden als grundsätzlich für den Einsatzzweck geeignet eingestuft. Bei den Tablets waren dies Samsung Galaxy Tab 4Active Pro Thunderbook Colossus A801 8“ sowie i.safe MOBILE IS930.RG und i.safe MOBILE IS655.RG. Bei den Smartphones gehörten Samsung Galaxy XCover6 Pro, i.safe MOBILE IS530.RG und i.safe MOBILE IS330.RG, Crosscall Core-X4 und Crosscall Core-X5 sowie Motorola Defy zu dem Kreis.

Hinsichtlich der Datenbrillen wurde die Verwendung des Navigator 500 vom Hersteller Realwear für den später beschriebenen und von leogistics durchgeführten Test gewählt. Elemente der Nutzung der Datenbrille waren "Kameraerkennung" und "Sprachsteuerung". Das Spektrum der insgesamt

betrachteten Daten- bzw. Mixed-Reality-Brillen umfasste daneben die Microsoft HoloLens 2 (Industrial Edition), die Magic Leap 2 (Enterprise Edition), die Vurix M400 und Vurix M4000 sowie die Lenovo ThinkReality A3.

Im Hinblick auf die Auswahl passender Technologien – oder, wie im ursprünglichen Titel des AP enger gefasst – von Endgeräten wurde auch der Einsatz von Sensorik verschiedener Ausprägung untersucht.

### **Sensorik**

Die Sensorik als Mittel zum Erfassen möglicher Schäden stellte einen Sonderfall dar, der sich aufgrund des Bezugs zu zwei Aspekten des AP 2 ergab. Vom Ansatz her wurde sie als potenzielle Datenquelle in AP 2.1 mit betrachtet, in ihrer technischen Ausprägung – quasi als mobiles System – war sie Gegenstand von AP 2.3. Zunächst wurden verschiedene Ansätze für Sensoren (akustisch, thermisch, optisch) hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit, ihres Informationsgehalts und ihrer erwarteten Genauigkeit zur Identifikation von Schäden untersucht.

Letztendlich wurde im Projekt aufgrund der Eignung in Bezug auf die Optimierungspotenziale und der Rückmeldungen der operativ erfahrenen Projektpartner die Entscheidung getroffen, einen Akustik-basierten Ansatz in Hinblick auf die Unterstützung des Wagenmeisters zu wählen. Ein optischer oder thermo-optischer Sensoren wurden verworfen.

Für die Gestaltung der Schallsensorik-basierten Erhebung von Daten für die WTU wurden verschiedene technologische Optionen betrachtet. Das Spektrum reichte von individuell mit spezifischen Schallsensoren aufgebauten Lösungen über bestehende Systemansätze artverwandter Anwendungen (z.B. Strukturveränderungen oder Risse in Behältern) bis hin zu dezidierten Komplettlösungen zur Schallmessung im Bahnbereich wie derjenigen von der Firma Müller BBM. Aufgrund der in AP 2.2 entwickelten Erkenntnisse und der Flexibilität in der Gestaltung einer Lösung fiel die Entscheidung in Richtung des Aufbaus und der Entwicklung einer spezifischen Lösung unter Verwendung einer Kombination eines Körper- und eines Luftschallempfängern als Sensorik.

In die Betrachtung zu möglichen passenden Schallsensoren wurden insgesamt acht Anbieter genommen, einer von ihnen mit zwei Technikansätzen. Die Aspekte, nach denen die Ansätze klassifiziert worden sind, waren die IP-Schutzklasse, der Temperatureinsatzbereich, das Gehäusematerial, die Größe bzw. der Durchmesser, das Gewicht, die Empfindlichkeit und die verwendeten Frequenzbereiche. Ein Nebenaspekt war das (bisherige) Einsatzgebiet, sofern Informationen verfügbar waren.

Bei der Entscheidung für die im weiteren Projekt vorgesehene und umgesetzte Schallsensorik waren dann drei Faktoren maßgeblich: Robustheit der Lösung im eisenbetrieblichen Einsatz, günstige Kosten in der Anschaffung und im Betrieb sowie flexible Einsatzmöglichkeiten, d.h. unter Einhaltung von Rahmenbedingungen ortsflexible Nutzung. Nebenbedingungen dieser Entscheidung waren das Anbringen bzw. Aufstellen der Sensorik und der sonstigen Hardware in Hinblick auf Zugänglichkeit und Schutz, die Energieversorgung, die kommunikative Anbindung sowie die Speicherung und Bereitstellung der Daten. Ein spezifischer Aspekt der (orts-)flexiblen Nutzung ist der Umstand, dass zum Teil Bedingungen herrschen, die bei anderen Systemen Ausschlusskriterium für die Anwendung sind.

Dies ist vor allem die häufige Anforderung bei einer Schallmessung, dass Geschwindigkeiten von mindestens 30 km/h notwendig sind. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass noch keine marktgängige Lösung für Geschwindigkeiten unter 25 km/h angeboten wird – dies aber im Rangierbetrieb die typische Geschwindigkeitsobergrenze ist.

Letztendlich fiel die Wahl auf das Luftschallmikrofon MI19SW-Rail und das Körperschallmikrofon KS81B - KS84100, beides bezogen über ROGA-Instruments.

Die Erarbeitung des jeweiligen Nutzungspotentials bestehender Low-Tech-Anwendungen für das Vorhaben (IoT-Devices, Smart Glasses oder Tablets) wurde begleitet zu beschriebenen Auswahlprozess in verschiedenen Gesprächsterminen mit den Projektpartnern, den operativen Anwendern und den Anbietern der jeweiligen Technologien vorgenommen.

Mit den im Auswahlprozess gewonnenen Erkenntnissen wurde aber auch deutlich, dass die Technologienentscheidungen weitere zu beachtende Implikationen mit sich bringen. So ist das Justieren des Midi-Interface hinter den Schallsensoren eine händisch-akustische Aufgabe, die in Verbindung mit Vor-Ort-Terminen und dort gemachten Erfahrungen gemacht werden muss. Grundsätzlich ist hier auch ein Aufbau zur Remote-Steuerung denkbar, dies erfordert aber andere Hardwarekomponenten und eine entsprechende softwaretechnische Ansteuerung.

Eine andere, den Prototypenbau und die Durchführung der Feldversuche beeinflussende Problematik nach den Technologienentscheidungen war, dass einzelne Hardwarekomponenten überraschend lange Lieferzeiten hatten.

#### Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr (SGKV) e.V.

Im AP 2 begleitete die SGKV die Identifikation und Bewertung der für die WTU relevanten externen Datenquellen und Endgeräte. Aufbauend auf den Ergebnissen der Prozessanalyse wirkte sie an der systematischen Aufnahme von Daten- und Schnittstellenanforderungen mit und brachte dabei die Sicht verschiedener KV-Standorte ein. Sie initiierte und organisierte Gespräche mit Anbietern externer Daten und Systeme (u. a. RailWatch, ASE) und moderierte entsprechende Abstimmungsrunden im Konsortium. Auf dieser Grundlage unterstützte die SGKV die Entwicklung eines Maßnahmenkatalogs, in dem die wichtigsten Digitalisierungs- und Entscheidungsunterstützungsmaßnahmen beschrieben und hinsichtlich erwarteter Wirkungen (Zeitersparnis, Qualitätsgewinne, Entlastung der Wagenmeister) bewertet wurden. Zudem beteiligte sie sich an der Sondierung geeigneter Endgeräte, insbesondere Smartphones, Tablets und Datenbrillen, und diskutierte deren Praxistauglichkeit unter realen Einsatzbedingungen im Kombinierten Verkehr. Die SGKV stellte dabei sicher, dass die geplanten technologischen Lösungen über die Projektstandorte hinaus auf andere Häfen und Terminals übertragbar sind und mit Entwicklungen wie der Digitalen Automatischen Kupplung verknüpft werden können

## 1.3 AP 3 Entwicklung einer Software zur Unterstützung der WTU

### II.1.1 Technische Grundkonzeption / Design Systemarchitektur

Auf der Grundlage der aktuellen Ist-Prozesse für die Wagentechnische Untersuchung in Lübeck und Duisburg (AP 1.1) wurde ein Soll-Prozess entwickelt und visuell dargestellt. Der Zielprozess hat dabei die Einbindung von Software – also der WTU-App – und den damit eingehenden optimierten Informationsfluss, der durch die Eliminierung von Medienbrüchen erreicht werden soll, berücksichtigt. Auch die weiteren Optimierungspotenziale, die in AP 1.2 erarbeitet wurden, haben ihre Berücksichtigung im Prozess gefunden.

Darüber hinaus wurden bereits die externen Datenquellen (AP 2.1) berücksichtigt, um Datenschnittstellen zu ermöglichen. Der Soll-Prozess wurde für die weitere Konzeption als Grundlage gesehen.

Zu Beginn der Konzeption wurde vor allem die grundlegende Systemarchitektur entwickelt. Dazu gehören die Stammdaten von Wagen und Ladeeinheiten und Ermittlungsregeln für die Verarbeitung von Eingabe- und Ausgabedaten. Auch wurden frühzeitig Datenfelder beschrieben, die für die Erstellung der relevanten Dokumente benötigt werden. Dabei wurde sich vor dem Hintergrund des Datenaustauschs im Kombinierten Verkehr an der DIN SPEC 91073 orientiert.

Als relevante Dokumente wurden die Wagenliste, das AVV-Schadprotokoll und die Ladeliste angesehen. Die Befüllung der Daten wurde als zentrale Funktion der Applikation behandelt.

In der Konzeptionsphase im Jahr 2022 wurde außerdem das erste Systemdesign erstellt. Dafür wurde ein „User Flow“ entwickelt, welcher eine visuelle Darstellung für die Feststellung und Erfassung eines Schadwagens ist. In dem Klick-Pfad wurden bereits vorausgefüllte Datenfelder und die User-Unterstützung berücksichtigt. Der grundsätzliche Ansatz war dabei immer, dass die Perspektive des Endanwenders eingenommen wird, um einen maximalen Nutzen zu erzielen.

Ende 2022 war die Konzeption weiter in Arbeit, die Fortsetzung erfolgte ab Jahresstart im Jahr 2023.

Das finale Konzept umfasst:

- Stammdaten (Wagen und Ladeeinheiten) als Basis für die Datenverarbeitung im System
- Externe Quellkataloge (z.B. AVV-Schadcodes)
- Systemstruktur und Datenfelder für die relevanten Dokumente (Wagenliste, Ladeliste, AVV Anlage 4)
- Statusprofile für Auftrags- und Ressourcenobjekte zur Bereitstellung von Zustandsinformationen
- Beschreibung von Datenschnittstellen (vor allem Wagenliste)
- Oberflächenspezifikation (Beschreibung von allen Ansichten, Funktionen, Dialogen, Pop-Ups, ...)

Im Jahr 2024 wurde die Anwendung dann vollständig umgesetzt. Die Anwendung wurde primär als mobile App konzeptioniert und kann somit vor allem über Smartphones und Tablets bedient werden.

Darüber hinaus wurde aber auch die Einbindung einer Datenbrille und die Darstellung der Anwendung mittels Augmented Reality beachtet. Die Steuerung und Navigation im zweiten Fall kann per Sprachbefehlen erfolgen.

Die mobile App lässt sich in die vier Ebenen *Zug-Ebene*, *Wagen-Ebene*, *Wagendetails* und *Schaderfassung* unterteilen.

### **Zug-Ebene:**

Auf der Zug-Ebene werden alle zu prüfenden Eingangs- und Ausgangszüge für den entsprechenden Verkehrstag abgebildet. Es werden Zugdaten wie die Zugnummer, der Verkehrstag und die Anzahl der Wagen im Zug dargestellt. Auch der Versand- und Empfangsbahnhof sind dargestellt.

Bezüglich der Wagentechnischen Untersuchung wird der aktuelle Prüfstatus („Neu“, „Bearbeitung“, „Abgeschlossen“ und „Freigegeben“) für jeden Zug dargestellt. Auch ist für die Bremsprobe und Gefahrgutkontrolle jeweils ein Icon vorhanden, welches dargestellt, ob die entsprechende Prüfung bereits durchgeführt wurde (grau = „nein“, grün = „ja“).

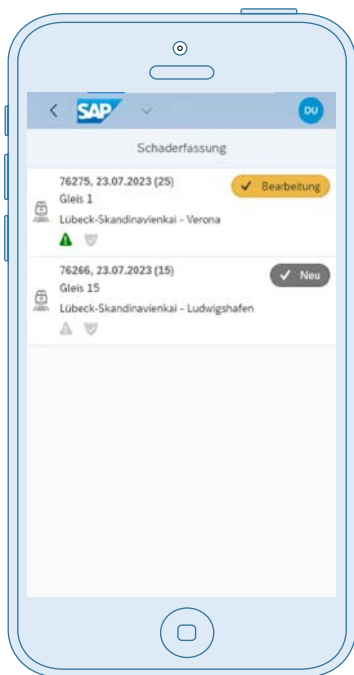


Abbildung 8: WTU-App "Zug-Ebene"

### **Wagen-Ebene:**

Nach einem Klick auf einen Zug in der Zug-Ebene öffnet sich die Detailansicht des Zuges, also die Wagen-Ebene. Die Wagen-Ebene beinhaltet als zentrales Element die Wagenliste des Zuges. Für jeden Wagen gibt es einen Listeneintrag, welcher Wageninformationen (UIC-Wagennummer, Position im Zug, Anzahl leere/beladene Achsen, Ladeeinheiten) sowie den Prüfstatus des Wagens beinhaltet. Dieser wird am linken und rechten Rand des Eintrags für die links- bzw. rechtsseitige Prüfung visuell (grau = „ungeprüft“, grün = „kein Schaden“, rot = „schadhaft“) dargestellt. Auch kann für jeden Wagen die Position im Zug nach oben oder unten verschoben werden.

Übergeordnet kann auch die gesamte Zugreihung über den Button „Zug stürzen“ umgekehrt werden. Des Weiteren befindet sich dort die Funktion der Bremsprobe. Ein Klick auf diesen Button öffnet einen



Abbildung 10: WTU-App "Zug-Ebene"

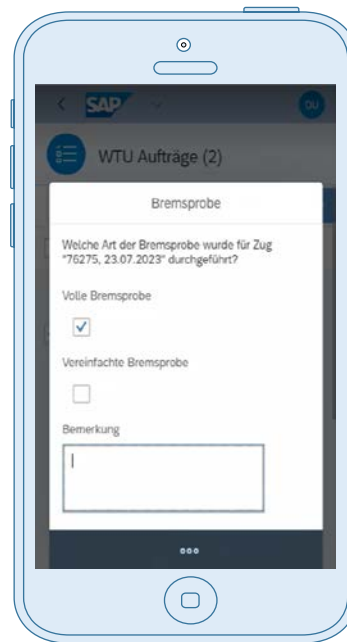


Abbildung 9: WTU-App "Bremsprobe"

Dialog, in dem die Bremsprobe quittiert werden kann.

### **Wagendetails:**

Für jeden Wagen können durch einen Klick auf den Eintrag in der Wagenliste Detailinformationen angezeigt werden. Dort können (fehlerhafte) Wagennummern und der Ladezustand geändert werden.

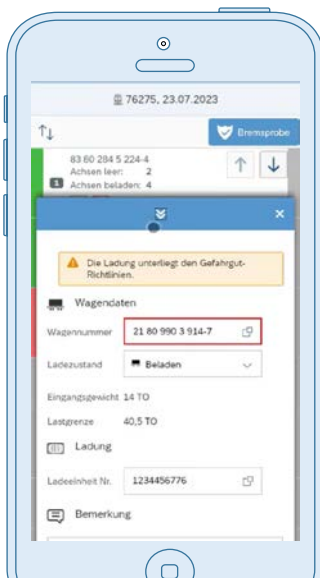


Abbildung 11: WTU-App "Wagendetails"

Darüber hinaus sind Gewichtsinformationen und die Ladeeinheiten dargestellt. Auch für Ladeeinheiten kann die Nummer, beispielsweise bei Fehlern, angepasst werden.

### **Schaderfassung:**

Die Durchführung der Wagentechnischen Untersuchung ist die zentrale Funktion der Anwendung. Diese kann in der Wagenliste über ein Wischen von links (linksseitige Prüfung) oder rechts (rechtsseitige Prüfung) gestartet werden. Sobald die Prüfung für einen Wagen gestartet wird, kann in dieser Ansicht durch die Wagenliste navigiert werden, ein weiteres Wischen ist somit nicht notwendig.

Für jeden Wagen kann ausgewählt werden, ob dieser einen Schaden hat oder nicht. Ist die Prüfung in Ordnung, wird dieser grün markiert und der nächste Wagen kann geprüft werden. Wird hingegen „Schaden“ angeklickt, kann die tatsächliche Schaderfassung erfolgen.

Diese Erfassung orientiert sich an der AVV-Anlage 4. Der Schadcode kann über zwei Wege erfasst werden: zum einen kann der Code direkt vollständig eingegeben werden. alternativ kann sich der User schrittweise durch den Code navigieren. Die eingegebenen Informationen werden dann als Schadinformationen am Wagen gespeichert.



Abbildung 12: WTU-App "Schaderfassung"

Wie bereits beschrieben wurde die App zwar als mobile App entwickelt, allerdings wurde auch eine Steuerung der App mittels Datenbrille erprobt.

Für das Vorhaben fand zunächst die Auswahl geeigneter Hardware statt. Vorgaben waren dabei beispielsweise eine Akkulaufzeit von mindestens fünf Stunden und eine hohe Temperaturverträglichkeit in beiden Extremen (Kälte und Wärme). Insgesamt wurden dann drei Brillen näher untersucht und in verschiedenen Kategorien miteinander verglichen. Aufgrund der Robustheit, Erfüllung aller festen Vorgaben und preislicher Vertretbarkeit wurde am Ende die „Realware HMT-1“ ausgewählt.

Der zentrale Vorteil der Einbindung und Verwendung einer Datenbrille ist die Hands-Free Verwendung einer App. Der Wagenmeister hat also beide Hände frei und kann einfach mittels Sprachsteuerung und

Kameraerkennung durch die App navigieren und Eingaben tätigen. Durch das Einlesen der Wagennummer wurde sich im Vergleich zur manuellen Eingabe ein verringertes Risiko von Falscheingaben erhofft. Vor dem Hintergrund dieser Vorteile wurde sich für die Einbindung der genannten Datenbrille entschieden.



Abbildung 13: Datenbrille "Realware HMT-1" mit Beschriftung (durch leogistics)

In der Folge fand dann die technische Integration statt. Dies umfasste sowohl die Einbindung der Brille als Ein- und Ausgabemedium für die App, als auch die technische Bildverarbeitung. Da die Brille genutzt werden sollte, um Wagennummern automatisch einzulesen, musste die Transformation des Bildes in die Wagennummer erfolgen.

Nach erfolgreicher Implementierung wurde die Brille dann unter Laborbedingungen am Gleis getestet. Dies fand sowohl in Lübeck als auch im Rahmen eines Kundenprojekts der leogistics statt. Die Ergebnisse der Tests waren durchaus positiv. Sowohl war die Akzeptanz durch alle Anwender sehr hoch, als auch der geschaffene Mehrwert. Die automatische Erfassung der Wagennummern spart Zeit ein und verhindert bzw. minimiert das Risiko von Falscheingaben. Insgesamt konnte die Dauer des Prozessschritts von vorher ca. 45 bis 60 Sekunden auf etwa 10 Sekunden reduziert werden.

Hinsichtlich der Datenschnittstellen wurde die Konzeptionierung durchgeführt. Die tatsächliche Implementierung wurde ebenfalls vorbereitet, vor dem Hintergrund der Entwicklung eines Prototyps wurden diese allerdings zunächst über Excel-Uploads realisiert. So war ausschließlich eine Anbindung an leogistics Rail notwendig, von wo der Upload der Excel-Dateien erfolgen konnte.

Die Anbindung fand nicht nur an Testsysteme, sondern auch an das Produktivsystem bei der Lübecker Hafengesellschaft (LHG Rail) statt.

Während des Projektverlaufs wurde das technische Konzept, vor allem vor dem Hintergrund der iterativen Optimierung (AP 5.2) weiter fortgeführt und aktualisiert.

Die Implementierung ist gemäß der Spezifikation erfolgt. Nach Anbindung der externen Datenquellen ist die Anwendung nutzbar.

Das Ziel, einen Prototyp zu entwickeln, war erfolgreich. Weitergehend ist es Ziel, die WTU-App zu einem kommerziellen Produkt im Rahmen von leogistics Rail weiterzuentwickeln.

Auch die Integration der Datenbrille wird in Kundenprojekten weiterverfolgt. Dabei soll zum einen die Integration in weitere Apps stattfinden. Außerdem soll der Einsatz dahingehend gefestigt beziehungsweise weiter stabilisiert werden, als dass eine produktive Nutzung der Technologie möglich ist.

## Sprints

In den Anschluss an die Konzeptionierung der Anwendung sollte die tatsächliche Entwicklung stattfinden. Dabei wurde mit SCRUM ein agiles Vorgehensmodell gewählt. Das Vorgehen fand dabei also in Sprintzyklen statt. Die Dauer eines Sprints wurde auf 2 Wochen festgelegt. Jeder Entwicklungszyklus besteht dabei aus den folgenden Phasen:

- Initiierung / Scoping / Planning
- Konzeptphase
- Designphase
- Realisierung
- Test

Für die Entwicklung wurden mehrere Ausbaustufen festgelegt. Die erste Ausbaustufe repräsentiert dabei den MVP (Minimal Viable Product). In folgenden Iterationen können weitere Ausbaustufen, wie beispielsweise die Einbindung von Vorbahnhöfen, realisiert werden.

Am Ende des zweiten Quartals im Jahr 2023 wurde mit der Entwicklung begonnen. Die Fertigstellung des MVPs erfolgte im Herbst 2023, der Meilenstein wurde damit eingehalten.

Der Fokus beim MVP lag vor allem auf der Vollständigkeit und Funktionalität der Datenfelder. Auch das Design wurde zu dem aktuellen Zeitpunkt als fertiggestellt angesehen. Das heißt, dass alle Anforderungen aus der Spezifikation implementiert wurden, mit weiteren Optimierungen im Anschluss an die Feldversuche wurde gerechnet. Der MVP hat somit die ersten Feldversuche ermöglicht.

Die Anbindung an ein Backend-System wurde Ende 2023 gestartet und im ersten Quartal 2024 fertiggestellt.

### **1.4 Hardware- und softwaretechnische Entwicklung zum Sensorik-Konzept**

Wie in Kapitel 1.2.3 beschrieben, wurde im Zuge der Identifikation und Auswahl von Technologien zur Unterstützung der WTU (AP 2) auch ein robuster, kostengünstiger und flexibler Ansatz einer Schallsensorik zur Gewinnung von WTU-relevanten Daten ins Auge gefasst. Dessen Entwicklung, auch wenn nur in Teilen Software betrifft, wird an dieser Stelle im Hinblick auf die Konzeption und hinsichtlich der Umsetzung und Entwicklung beschrieben.

Unabhängig von den Entwicklungsarbeiten von leogistics und den dortigen Sprints verlief die Softwareentwicklung zum Sensorik-Ansatz durch das IML. Die anfallenden Programmierungsaufgaben

betrafen das Aufbereiten, Auswerten und Interpretieren der erfassten Sensorschalldaten und das Erkennen von Mustern in den Amplituden hinsichtlich möglicher Schadfälle. Es wurde die Basis für die automatisierte, ggf. KI-basierte Interpretation der Sensorschalldaten erarbeitet. Der Grad der „KI-Fähigkeit“ hängt dabei allerdings von der Menge eindeutig klassifizierter Schadwagenschalldaten ab.

Die Sensorik-Box ist ein projektspezifisch aufgebautes Gerät, das verschiedene Technologien kombiniert, um eine effektive Überwachung, Erfassung und Weitergabe der Schalldaten zu ermöglichen. Ausgestattet mit einem Körperschallsensor erfasst die Box zuverlässig die Schallvibrationen, die am Gleis auftreten. Die Verarbeitung der Schalldaten erfolgt über das integrierte Midi-Interface. Hierfür wurde ein Tascam US-2x2HR verwendet. Das Midi-Interface stellt die Verbindung zwischen den Sensoren (Körper- und Luftschallsensor) und dem Computer, in diesem Fall ein Raspberry Pi 4, her und ermöglicht so die Übertragung von Midi-Daten. Da das Midi-Interface mehrere Ein- und Ausgänge bietet, war es als Basis zum Erfassen und Verbinden der verschiedenen Schallquellen passend.

Der Minicomputer, der Raspberry Pi 4, fungiert als zentrale Steuereinheit und ist mit einem Mobilkommunikationsmodul ausgestattet, das eine Fernüberwachung und -steuerung ermöglicht. Dadurch können die Schalldaten, unter der Voraussetzung einer entsprechenden Datenbandbreite und Netzverfügbarkeit, in Echtzeit übertragen werden. Der Raspberry Pi 4 bot sich als Minicomputer an, weil er trotz seiner kompakten Bauweise eine hohe Rechenleistung, vielseitige Anschlussmöglichkeiten und geringen Stromverbrauch bietet. Insgesamt stellen der Raspberry Pi und das Mobilkommunikationsmodul den hinsichtlich des Volumens wesentlich kleinsten Teil des Aufbaus der Sensorik-Box dar.

Weil in der zweiten Ausbaustufe ein energieautarker und ortsflexibler Einsatz der Sensorik-Box vorgesehen war, versorgt ein zusätzliches Solarpanel die Sensorik-Box mit Energie, während der eingebaute Akku sicherstellt, dass das System auch bei unzureichender Sonneneinstrahlung betrieben werden kann. Der Weg hin zu der gerade beschriebenen Sensorik-Box wird noch einmal dezidierter im Kapitel 1.4 (AP 4 Durchführung der Feldversuche) beschrieben.

Die gewählte Kombination aus Technologien bzw. Systemen stellt einen in sich geschlossenen Ansatz dar und erfüllt die gestellten Anforderungen. Aus den Feldversuchen lassen sich Ansätze für Modifikationen oder Verbesserungen ableiten.

Aus den technischen Gegebenheiten und Möglichkeiten ergaben sich die Fragestellungen in Bezug auf die Software und die Nutzung der Schalldaten für den Wagenmeister.

Für die Bewertung der Schalldaten-Samples war zu klären, in welcher Form und an welcher Stelle (Raspberry Pi oder zentraler Rechner / Server) diese erfolgen sollte. Damit einher ging die Frage, ab welcher Menge an Samples eine Automatisierung der Analyse und Bewertung per KI anstelle einer Datenanalyse möglich wird. Im Zuge des Aufbaus eines geeigneten KI-Modells stellte sich die Frage nach einer Beurteilung der Schall-Samples durch die Wagenmeister mit dem Ziel einer Klassifizierung für das Modell – und dem damit verbundenen Aufwand. Eine weitere Herausforderung liegt in der Bereitstellung und dem Vorliegen der Wagenliste zum Erfassungszeitpunkt, damit ein Abgleich

zwischen den erfassten und eine potenzielle Schadstelle induzierenden Schalldaten und der Wagenliste zur Zuordnung vorgenommen werden kann. Eine weitere Verbesserung dieser Zuordnung wird in Verbindung mit dem Abgleich mit einer Wagendatenbank erwartet, der Zugriff konnte zur Laufzeit des Projektes nicht hergestellt werden.

Das Prinzip der Detektion von Schäden an Rädern der Wagen in Form von Flachstellen oder Aufschweißungen basiert auf einer genauen Analyse von Schallsignalen, die während der Zugfahrt aufgenommen werden. Das Prinzip der Datenanalyse und die damit verbundene Softwareentwicklung wird nun erläutert.

Bevor die eigentliche Entwicklung der Softwarebausteine zur Detektion von Schäden erfolgte, wurden genaue Analysen der während der ersten Testphase und zu Beginn der zweiten Testphase (s. Kap. 1.4.3) gewonnenen Schalldaten durchgeführt. Diese dienen dazu, um Besonderheiten in den Daten zu identifizieren. Die durchgeführten Analyseschritte waren im Kern folgende:

1. **Bandpass**-Filterung: Ein Bandpassfilter wird angewendet, um Frequenzen außerhalb eines bestimmten Bereichs (100 Hz bis 2000 Hz) zu entfernen. Dadurch können unerwünschte Störgeräusche reduziert und die relevanten Frequenzbereiche hervorgehoben werden.
2. **Erstellung** eines **Spektrogramms**: Zu den gefilterten Audiodaten werden dann jeweils Mel-Spektrogramme erstellt. Diese visuelle Darstellung zeigt, wie die Energie der Frequenzen über die Zeit variiert. Zum Verständnis für den menschlichen Betrachter wird das Spektrogramm in Dezibel umgewandelt und als zweidimensionale Grafik dargestellt.
3. **Reduktion** des **Spektrogramms**: Das Spektrogramm wird über die Frequenzdimension summiert, sodass eine eindimensionale Darstellung entsteht. Diese Darstellung zeigt die Gesamtdynamik der Audiodaten über die Zeit.
4. **Erkennung** und **Charakterisierung** von **Spitzen (Peaks)**: Spitzen werden in der eindimensionalen Darstellung detektiert, um Besonderheiten und die zugrundeliegenden Muster (z. B. Schläge der Räder von Wagen oder andere periodische Signale) zu identifizieren. So wird beispielsweise die Dichte, d.h. die Anzahl der detektierten Peaks, als Indikator für Besonderheiten verwendet. Dabei werden nur signifikante Spitzen berücksichtigt, deren Höhe mindestens 50% des Maximalwerts beträgt und die einen Mindestabstand von 20 Datenpunkten zueinander haben. Die Charakteristika und Statistik der Peaks werden dann als Basis für die Entwicklung des Algorithmus und der Software zur Identifikation von Anomalien und damit möglicher Schadwagen ausgewertet und zusammengeführt.
5. **Visualisierung** der **Peaks**: Abschließend werden die obigen Ergebnisse, insbesondere die gefundenen Peaks, grafisch dargestellt, um die Analyse zu veranschaulichen. Die diente aber im Wesentlichen dem Verständnis und zur Diskussion unter den beteiligten Projektpartnern und Softwareentwicklern, z.B. zum Abklären der Bedeutung bestimmter Auffälligkeiten oder zur Justierung von Parametern.

Die Bandpass-Filterung, die das Erstellen von Spektrogrammen und die Analyse der Spitzen dienen also methodisch als Grundlage der Identifikation der Charakteristik möglicher Flachstellung bzw. Aufschweißungen.

Der eigentliche Analyseprozess, der auf diesen Erkenntnissen aufbauend entwickelt worden ist und dazu dient, Anomalien zu identifizieren und relevante Informationen weiterzuleiten, lässt sich in mehrere, nachfolgend beschriebene Schritte unterteilen.

Zu Beginn steht die kontinuierliche Überwachung und Schallaufnahme. Im ersten Schritt werden Schallsignale, die von vorbeifahrenden Zügen erzeugt werden, kontinuierlich überwacht und aufgezeichnet. Dies erfolgt durch präzise installierte Mikrofone oder Sensoren, die in der Lage sind, akustische Wellen in hoher Qualität zu erfassen. Die Schallsignale werden analysiert, um Veränderungen im Pegel zu identifizieren. Solche Veränderungen können auf ein ankommendes Fahrzeug hinweisen und umfassen typischerweise drei Phasen: das Anschwellen des Pegels, eine Haltedauer sowie das anschließende Abschwelen. Sobald ein Zug erkannt wird, werden die relevanten Daten für eine detaillierte Auswertung aufgezeichnet.

Danach werden die Daten, je nachdem, wie die Konfiguration und die technische Anbindung sind, vor Ort oder in einem zentralen Rechner analysiert. Nach dem Erfassen der Schallsignale erfolgt die Analyse entweder direkt vor Ort mithilfe des lokalen Mini-Rechners oder zentral auf einem leistungsstärkeren Server. Ziel ist es, charakteristische Muster zu erkennen, die auf mögliche Schäden wie Flachstellen und Anomalien hinweisen. Dabei werden verschiedene Parameter und Kriterien berücksichtigt, um die Analyse möglichst präzise zu gestalten, aber ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Rechenaufwand und Analyseparametern einerseits und der Vermeidung von Fehl- oder Überinterpretationen andererseits zu gewährleisten. Die wichtigsten Charakteristika, die dabei untersucht werden, umfassen:

- **Dauer der Spitzenamplitude**  
Die Zeitspanne, in der die Amplitude eines Schallsignals ihren höchsten Wert erreicht und diesen hält, wird gemessen und analysiert. Diese Dauer kann ein Indikator für die Schwere und Art der Anomalie sein.
- **Faktor der Spitzenamplitude im Verhältnis zum Durchschnitt**  
Es wird überprüft, wie stark der Spitzenwert (Peak) der Amplitude vom durchschnittlichen Pegel des Schallsignals abweicht. Ein signifikanter Unterschied kann auf eine Unregelmäßigkeit hinweisen.
- **Analysezeitfenster**  
Ein definiertes Zeitintervall wird festgelegt, in dem nach Anomalien gesucht wird. Innerhalb dieses Zeitfensters wird zudem die Anzahl der erfassten Peaks analysiert, um zu bewerten, ob eine Stelle als relevant eingestuft werden kann.

Zudem werden gewisse Mindestanforderungen an den durchschnittlichen Ausschlag einer Amplitude gestellt. Dies dient dazu, Fehlalarme durch kleinere, unbedeutende Geräusche wie „Zwitscherer“ zu vermeiden. Es wird ein Mindestwert für den durchschnittlichen Ausschlag der Amplitude definiert. Nur Signale, die diesen Schwellenwert überschreiten, werden weiter analysiert.

Die Daten, wahlweise die bereits vor Ort analysierten Sounddateien oder die Rohdaten der Schallaufnahmen, werden anschließend über eine gesicherte Verbindung, im Projektpilotfall in der zweiten Ausbaustufe mittels Mobilfunkkommunikation, an einen zentralen Rechner übertragen. Konkret wurde im Projekt eine Tunnelverbindung (VPN) über das Mobilfunknetz aufgebaut, die nur aus einem dezidiert zugewiesenen Rechnernetzwerk erreichbar ist. Der Einsatz einer nicht gesicherten Übertragungsmethode war per se ausgeschlossen, da ob der Autarkie und Positionierung der Sensorik-Box ein unbefugter Zugriff bis hin zum Aufschalten auf den Mini-Rechner drohen würde.

Die empfangenen Daten werden mit Fahrplandaten und Wagenlisten abgeglichen, um die erkannte Anomalie einem spezifischen Zug und – wenn möglich – einem bestimmten Wagen innerhalb des Zuges zuzuordnen. Diese Zuordnung ist von Bedeutung, um gezielt die Schadensprüfung und -beurteilung durch den Wagenmeister vornehmen zu lassen und anschließend die notwendige weitere Behandlung des Schadens vornehmen zu können.

Abschließend werden die identifizierten Informationen in einer für den Wagenmeister nutzbaren Form bereitgestellt. Dies umfasst sowohl die Hinweise auf mögliche Schäden wie Flachstellen als auch die relevanten Aufzeichnungen des Schallsignals, die die Anomalien dokumentieren. Zusätzlich werden die Positionen im Zug, an denen die Anomalien festgestellt wurden, markiert.

### **Vorgehensweise zur Analyse von Schalldaten zur Detektion von Schadwagen-induzierende Anomalien**

Die beschriebene Analyse der Audiodateien wurde softwaretechnisch in Python spezifisch für das Projekt DIANA umgesetzt. Das Python-Skript dient der anforderungsgesteuerten oder fortlaufenden Analyse von Audiodateien zur Identifikation von Anomalien in den Körperschallaufnahmen, die die Charakteristika erfüllen, die auf Flachstellen oder Aufschweißungen hindeuten.

Die Grundlage des Python-Skripts sind mehrere Bibliotheken, die in Kombination genutzt werden, um eine effiziente Verarbeitung, Analyse und Speicherung der Ergebnisse zu gewährleisten. Nachfolgend werden diese – mit Bezug zur Aufgabe in den DIANA-Python-Skripten – kurz vorgestellt:

1. **SoundFile:** Die Python-Bibliothek SoundFile bietet verschiedene Tools zur Verarbeitung von Audiodateien. Sie ermöglicht das Einlesen und Schreiben von Audiodaten, auch als bearbeitete Segmente, in verschiedenen Formaten wie WAV, FLAC oder AIFF und die Manipulation von Audiodaten, z. B. für Signalverarbeitung oder Maschinelles Lernen. Zentrale, im Projekt genutzte Fähigkeiten von SoundFile sind die Verarbeitung von Audiodaten als NumPy-Arrays (s.u.) und das Auslesen von Metadaten wie Samplerate oder Kanäle. Darüber hinaus unterstützt die Bibliothek sowohl mono- als auch mehrkanalige Audiodateien.
2. **NumPy:** Mit der Bibliothek NumPy werden effiziente numerische Berechnungen durchgeführt. Sie dient beispielsweise zur Berechnung von Mittelwerten und zur Erzeugung von Zeitvektoren für die Analyse.
3. **matplotlib:** Diese Bibliothek wird zur grafischen Darstellung der Ergebnisse eingesetzt. Auffällige Stellen in den Audiodaten werden visualisiert, inklusive Markierung der erkannten

Peaks. Die Visualisierung dient vornehmlich dem besseren Verständnis der menschlichen Betrachter.

4. **scipy.signal**: Die Funktion `find_peaks` aus SciPy wird verwendet, um Spitzen in den Amplituden der Audiodaten zu identifizieren. Dies ist ein zentraler Schritt zur Erkennung von Anomalien.
5. **os**: Die Bibliothek ermöglicht das Navigieren durch Verzeichnisse und das Erstellen von Speicherpfaden für die Ausgabe der Ergebnisse.
6. **zipfile**: Diese Bibliothek dient dem Extrahieren von WAV- oder FLAC-Dateien aus ZIP-Archiven, um auch komprimierte Daten analysieren zu können. Dieses Erfordernis ergab sich aus den Speicherkapazitäten und Mobilfunk-Übertragungsraten.

### **Ablauf der Audioanalyse im Kern**

Die zu analysierenden Dateien werden mit `soundfile` geöffnet, und die Amplitudenwerte sowie die Samplerate werden extrahiert. Falls die Audiodaten als ZIP-Archive mit WAV- oder FLAC-Dateien vorliegen, werden die Dateien extrahiert und automatisch analysiert. Dabei wird nur der Frequenzbereich im hörbaren Bereich bis 5.000 Hz genutzt und gespeichert, da die Voranalysen diesen als analyserelevant ausgewiesen haben. Danach wird der Audiostream in sich überlappende Zeitfenster gleicher Länge unterteilt. Für jedes Fenster wird die durchschnittliche Amplitude berechnet.

Die eigentliche Anomalieerkennung erfolgt mithilfe einer Funktion namens `find_peaks`; dort werden Spitzen in der Amplitude identifiziert, die bestimmte Kriterien, wie Höhe und Dauer, erfüllen. Ein Zeitfenster wird als auffällig markiert, wenn eine ausreichende Anzahl von Peaks erkannt wird und die durchschnittliche Amplitude einen Mindestwert überschreitet.

Für diejenigen Fälle, in denen eine Auffälligkeit erkannt worden ist, werden eben diese auffälligen Abschnitte der Audiodaten als separate WAV- oder FLAC-Dateien gespeichert. Zudem wird ein Diagramm erstellt, das den auffälligen Abschnitt der Aufnahme darstellt. Peaks und zusätzliche Informationen wie maximale Amplitude, Durchschnittswerte und Dauer der Anomalie werden visualisiert.

Das Skript setzt auf festgelegte Parameter, wie den Faktor zur Peak-Erkennung oder die Mindestanforderung an die durchschnittliche Amplitude, um Anomalien zu klassifizieren. Diese Parameter wurden auf Basis typischer erlernter Werte eingestellt und können je nach Anwendung angepasst werden. Die Ergebnisse werden sowohl visuell als auch in Form von Audioschnitten bereitgestellt, um eine einfache Nachbearbeitung und Dokumentation zu ermöglichen.

Das Visualisieren und gebündelte, d.h. mehrere Eingangsdateien umfassende, Verarbeiten und Analysieren ist nur für den Fall relevant, dass dies auf einem zentralen Rechner erfolgt. Für die direkte Verarbeitung auf dem Mini-Rechner der Sensorik-Box entfällt dies.

Die Analyse basiert derzeit auf festen statistischen Methoden und nutzt keine KI-Ansätze. Dies macht den Ansatz weniger flexibel bei komplexeren Mustern, bietet jedoch eine transparente und gut kontrollierbare Methodik.

#### Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr (SGKV) e.V.

In AP 3 war die SGKV in erster Linie inhaltlich-konzeptionell beteiligt und vertrat die Perspektive der Anwender und der Branche. Auf Basis, der in AP 1 erarbeiteten Ist-Prozessketten wirkte sie an der Erarbeitung eines Soll-Prozesses mit, der die Einbindung der WTU-Software in den Gesamtprozess der Zugprüfung beschreibt und Medienbrüche systematisch reduziert. Gemeinsam mit den technischen Partnern wurden hierfür erforderliche Stammdaten (z. B. Wagen- und Ladeeinheitsdaten) und funktionale Ermittlungsregeln definiert. Ein besonderes Augenmerk der SGKV lag auf der Berücksichtigung der in der DIN SPEC 91073 beschriebenen Prozess- und Statusdaten, um eine standardkonforme und standortübergreifend nutzbare Lösung sicherzustellen. Im Verlauf der agilen Entwicklung der WTU-App nahm die SGKV regelmäßig an Workshops, Sprints-Reviews und Tests teil, prüfte die fachliche Ausgestaltung von Benutzeroberflächen und Dokumentenlogik (u. a. Wagenliste, AVV-Schadprotokoll, Prüfbericht) und brachte Erfahrungen aus den Prozessanalysen sowie Rückmeldungen der Wagenmeister ein. Damit trug sie wesentlich dazu bei, dass der Prototyp nicht nur technisch funktionsfähig, sondern auch aus Anwendersicht handhabbar und an die betrieblichen Abläufe im KV angepasst ist.

## **1.5 AP 4 Durchführung der Feldversuche**

### Planung der Feldversuchsphasen

Ein zentrales Element des Projekts DIANA war die Durchführung praxisnaher Feldversuche, um die entwickelten digitalen Werkzeuge zur Unterstützung der wagentechnischen Untersuchung (WTU) unter realitätsnahen Bedingungen zu testen. Die Versuchsreihen dienten dazu, Erkenntnisse über die Anwendbarkeit, Praxistauglichkeit und mögliche Weiterentwicklungsbedarfe der Systemlösungen zu gewinnen. Zugleich bildeten sie die Grundlage für die Evaluation technischer Funktionen, potenzieller Effizienzgewinne und organisatorischer Anschlussfähigkeit der entwickelten Ansätze.

### **Zielsetzung und Planungsrahmen**

Die Feldversuche verfolgten mehrere Ziele:

- Erprobung der WTU-App zur digitalen Unterstützung der Wagenmeister im Terminalbetrieb,
- Integration und Nutzung realer Datenquellen (z. B. Wagenlisten, Schadprotokolle),
- Bewertung der technischen Funktionalität, Systemstabilität und Nutzerfreundlichkeit,
- Prüfung der prozessualen Anschlussfähigkeit der digitalen Lösung in bestehende Abläufe,
- Sammlung praxisbezogener Hinweise für die spätere Implementierung und Skalierung,

- sowie die Erfassung qualitativer und quantitativer Rückmeldungen zur Wirksamkeit des Systems.

Die Planung der Feldversuche erfolgte entlang eines modularen Vorgehens und unter Einbeziehung aller beteiligten Partner. Sie beinhaltete sowohl die organisatorische Vorbereitung als auch die technische Implementierung an den beiden Erprobungsstandorten Lübeck und Duisburg, die aufgrund ihrer unterschiedlichen strukturellen Rahmenbedingungen gezielt ausgewählt wurden.

### **Organisatorische und technische Vorbereitung**

Bei der Planung und Durchführung der Versuche mussten verschiedene Voraussetzungen geschaffen und spezifische Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Dazu gehörten unter anderem:

- **Personelle Vorbereitung:** Es wurde frühzeitig abgestimmt, welche Mitarbeitenden an den Versuchen beteiligt sein sollten. Besonders die Einbindung von Wagenmeistern als direkte Nutzer der App war essenziell. Diese wurden technisch eingewiesen und vorab mit der Funktionsweise der App vertraut gemacht. Die Tests wurden so koordiniert, dass sie in die betrieblichen Abläufe integriert werden konnten, ohne diese wesentlich zu beeinträchtigen.
- **Technische Ausstattung:** Für die Nutzung der App wurden mobile Endgeräte (insbesondere Tablets) bereitgestellt, die im Vorfeld getestet und mit der notwendigen Software ausgestattet wurden. Parallel wurden Schnittstellen zu Datenquellen vorbereitet oder simuliert, um praxisrelevante Inhalte (z. B. Zugdaten, Wagenreihenfolgen) in der App verfügbar zu machen.
- **Datenintegration:** In Vorbereitung der Feldversuche wurde analysiert, inwiefern reale Betriebsdaten eingebunden werden konnten. Die zur Verfügung stehenden Informationen wurden entweder direkt aus Terminalsystemen exportiert oder über vorbereitete Imports in das Testsystem eingespielt.
- **Sicherheits- und Infrastrukturfragen:** Besonders bei der stationären Sensorik in Duisburg wurde auf geeignete Installationsorte geachtet. Hier mussten Anforderungen wie Stromversorgung, Standortzugänglichkeit und ausreichende Netzabdeckung geprüft und abgestimmt werden.
- **Testdesign und Evaluationslogik:** Die Durchführung der Tests erfolgte entlang vorab definierter Prüfscenarien, die unterschiedliche Ablaufsituationen (z. B. Vorprüfung, WTU mit Echtzeitdatenerfassung) abbilden sollten. Parallel wurde ein Beobachtungsraster definiert, das eine strukturierte Erfassung von Nutzungsverhalten, Bearbeitungszeiten, Medienbrüchen und Rückmeldungen ermöglichte.

### **Standortbezogene Durchführung**

Die praktischen Feldversuche fanden an den beiden Projektstandorten **Lübeck** und **Duisburg** statt und wurden jeweils standortspezifisch vorbereitet und umgesetzt.

#### **Lübeck: Erprobung der WTU-App**

##### **1. Testphase (11.–12. März 2024):**

In dieser ersten Erprobungsreihe wurde ein weiterentwickelter Prototyp der WTU-App erstmals unter

realen Bedingungen getestet. Die Vorbereitungen umfassten die Auswahl geeigneter Züge, die technische Ausstattung der Wagenmeister sowie die Integration notwendiger Daten. Der Test wurde von Projektpartnern begleitet, um technische Rückfragen direkt klären und Optimierungspotenziale erfassen zu können.

## **2. Testphase (12. November 2024):**

Die für den 26. August 2024 geplante zweite Testphase musste aufgrund kurzfristiger betrieblicher Einschränkungen verschoben werden. Der Nachholtermin im November ermöglichte eine weitere vertiefte Erprobung der App in realitätsnahen Abläufen. Die App wurde hierbei durch das Prüfpersonal erneut praktisch eingesetzt, wobei insbesondere Rückmeldungen zu Nutzerführung, Dokumentation und Systemreaktion gesammelt wurden.

### **Duisburg: Sensorik zur Flachstellendetektion**

#### **Fortlaufender Testbetrieb ab Frühjahr 2024:**

In Duisburg wurde eine autarke Sensoriklösung installiert, um die Möglichkeit der automatisierten akustischen Raddiagnose (z. B. zur Identifikation von Flachstellen) zu erproben. Die Auswahl des Installationsortes erfolgte in Abstimmung mit dem Standortbetreiber unter Berücksichtigung technischer Infrastruktur. Nach der Inbetriebnahme wurden im Projektverlauf mehrere Nachjustierungen vorgenommen. Die erzeugten Audiodaten wurden dokumentiert und zur weiteren Analyse bereitgestellt.

Die Kombination beider Ansätze – mobile Unterstützung der WTU und begleitende Sensorik – sollte exemplarisch zeigen, wie sich Prozesse rund um die Wagenprüfung künftig effizienter und datenbasierter gestalten lassen.

## **Technische Einbindung / Anlernen der Wagenmeister**

Die technische Einbindung sowie das Anlernen der Wagenmeister in Bezug auf die Projektentwicklungen WTU-App und Schall-Sensorik-Box erfolgte losgelöst voneinander, da zum einen unterschiedliche Ansätze dahinterstehen und zum anderen die Form der Interaktion der Wagenmeister unterschiedlich ist. Daher erfolgte separate Behandlung und somit wird dies an dieser Stelle auch separat dargestellt.

### **WTU-App**

Das grundsätzliche Vorgehen bei der Entwicklung der WTU-App ist die iterative Optimierung des MVPs (AP 3.2). Um dies zu ermöglichen und dabei die Sicht der Endanwender zu berücksichtigen wurden frühzeitig die Wagenmeister eingebunden. Schon vor dem ersten Feldversuch konnten so innerhalb eines Workshops Anhaltspunkte für die Optimierung abgeleitet werden. Die Punkte betrafen dabei vor allem kleinere Anpassungen am Design und der Funktionsweise der Anwendung.

Die Anpassungen wurden fortlaufend umgesetzt und in der Gesamtspezifikation dokumentiert.

Der erste Feldversuch fand im Oktober 2023 in Duisburg statt. Zusätzlich zu der bisherigen Einführung der Wagenmeister fand eine erneute Einweisung durch die leogistics am Gleis statt. So wurde ein

reibungsloser Ablauf ermöglicht. Für die Durchführung wurden im Vorfeld Wagenlisten realer Züge zusammengetragen. Obwohl es zu diesem Zeitpunkt an ein Backend-System gab, konnten testweise Simulationen mit echten Zugdaten durchgeführt werden.

Auch im Anschluss fand eine weitere Einarbeitung der Wagenmeister in Form von Online-Terminen, Präsentationen und Feldversuchen statt.

Der zweite Feldversuch war für das erste Quartal 2024 in Lübeck geplant und wurde so auch durchgeführt. Bei diesem Textdurchlauf fand dann die geplante Anbindung an ein Backend-System (LHG Rail) statt.

Im Anschluss an den praktischen Test fand eine gemeinsame Feedbacksession mit den Wagenmeistern statt, um wiederum zusätzliche Anknüpfungspunkte für die weitere Optimierung der Anwendung abzuleiten.

Der weiteren wurde speziell die Datenbrille im Rahmen eines Kundenprojekts der leogistics getestet. Dabei wurde zum einen eine hohe Akzeptanz in verschiedenen Altersstufen der Anwender festgestellt. Des Weiteren konnte die fehlerfreie Dateneingabe wie erhofft bestätigt werden. Bezüglich der Effizienzsteigerung wurde konnte die Wagenummer Erfassung von ursprünglichen 45 bis 60 Sekunden auf ca. 10 Sekunden reduziert werden. Die Datenbrille konnte damit als geeignete Technologie bestätigt werden.



Abbildung 14: Test der Datenbrille

### **Schall-Sensorik-Box**

Die Zusammenarbeit mit den Wagenmeistern von Duisport und NRS waren von zentraler Bedeutung für die Auswertung der ermittelten Schall-Daten. Hier wurden mehrere Workshopreihen mit den Wagenmeistern durchgeführt

1. Feedback zur grundsätzlichen Idee
2. Aktive Begleitung bei der Datenaufnahme beim Techniktest
3. Aktive Begleitung bei Datenaufnahme des Prototyps mit Feedback zu Aufstellort und Gleisqualität zur Störgeräuschminderung
4. Feedback zu vorsortierten Datensätzen zur Verifizierung der Flachstellen und Aufschweißungen als Schadmerkmale

Die genaue Form der Einbindung wird im Kapitel 1.4.3 genauer beschrieben.

## Test der Maßnahmen

Gemäß der Planung und Vorbereitung der Tests und des Einbeziehens der Wagenmeister wurden verschiedene Testreihen zu den Technologien und Maßnahmen durchgeführt. Diese sind nachfolgend, wieder nach Entwicklungen WTU-App und Schall-Sensorik-Box differenziert, dargestellt.

### **WTU-App**

Die Tests bezüglich der Wirksamkeit der getroffenen Optimierungsmaßnahmen wurden im Rahmen der Feldversuche durchgeführt. Demnach fanden die ersten Tests im Herbst 2023 beim Feldversuch in Duisburg statt.

In Duisburg wurde vor allem geprüft, ob die Anwendung alltagstauglich und anwenderfreundlich sind. Darüber hinaus wurde geprüft, ob durch den Einsatz der WTU-App und die damit verbundene Führung durch den Prüfungsprozess und angezeigte Hinweismeldungen eine Qualitätssteigerung erzielt werden kann. Obwohl es sich bei dem Test nur um einen MVP handelte, konnten beide Tests erfolgreich bestanden werden. Weiterführende Tests waren dann für den Feldversuch in Lübeck angedacht.

Wie geplant wurden bei dem zweiten Feldversuch in Lübeck neben der reinen Funktionalitätsprüfung weitere Tests durchgeführt.

Hinsichtlich des allgemeinen Prozesses, also der Durchführung der Wagentechnischen Untersuchung, wurde geprüft, ob mit der Nutzung der Applikation Zeitersparnisse im Prozess erzielt werden können. Darüber hinaus wurde die Möglichkeit des automatischen Datenaustauschs mit externen Systemen (in diesem Fall LHG Rail) geprüft. Letztlich wurde der qualitative Mehrwert durch den WTU-App Einsatz untersucht.

Speziell für den Fall, dass ein Schadwagen ermittelt wurde, wurde ebenfalls die Zeitersparnis und die Qualität beim Erfassen und der Kommunikation bewertet. Auch die Einfachheit der Bedienung in diesem Fall durch die App-Unterstützung hat dabei eine Rolle gespielt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Anwendung eine gute Bedienbarkeit hat. Die Funktionalitäten sind korrekt und anforderungsgemäß und es werden die gewünschten Ergebnisse geliefert. Die einzige Ausnahme ist hier die Versendung des Prüfprotokolls, welche im Rahmen des Prototyps noch nicht umgesetzt wurde. Dies war im Vorfeld als eine Ausbaustufe angedacht, schränkt die Funktionalität der Wagentechnischen Untersuchung aber nicht ein und kann im Rahmen der Weiterentwicklung implementiert werden.

### **Schall-Sensorik-Box**

Im Folgenden werden die Tests und Feldversuche zur Detektion von Schadwagen mithilfe neuartiger Schall-Sensorik bei der Eingangskontrolle und mit der dazu entwickelten Sensorik-Box beschrieben.

Zu der Schall-Sensorik-Box, die den Wagenmeistern Daten und Entscheidungsinformationen zu möglichen Schadwagen liefern soll, sind zwei längere Testphasen geplant und umgesetzt worden. Die

zugrundeliegende Konzeption und hard- und softwaretechnische Umsetzung sind in den Kapiteln 1.2.3 beziehungsweise 1.3.3 nachzulesen.

### 1. Technischer Einsatztest – 1. Prototyp in Duisburg (2024)

Der erste Prototyp hatte zur Aufgabe, die grundsätzliche Methodik zu testen. Als Ort wurde für den Test in einem Gebäude der duisport rail direkt in Gleisnähe ein Aufstellplatz zur Verfügung gestellt, von dem aus Zugang zum Gleis besteht. Dort wurden Körperschall- und Luftschall-Sensoren direkt am Gleis bzw. in einem Meter Abstand zum Gleis angebracht. Diese wurden zur Datenübernahme und späteren Auswertung mit einem Kabel zum Notebook-Aufstellplatz verbunden. Zur Sicherheit erfolgte eine Kabelabdeckung auf den Gehflächen. Die Daten werden über das Midi-Interface, das die Anbindung und Übertragung der Körperschall- und Luftschall-Sensoren gewährleistet und die Aussteuerung der eingehenden Schalldaten vornimmt, und ein Notebook ohne Internetzugang erfasst und gespeichert. Beides steht direkt in dem Büro der Disposition.

Die Installation war ungefähr sechs Monate im Jahr 2024 vor Ort und erfasste, lokal gespeichert, mit Unterbrechungen Daten vorbeifahrender Züge. Der Aufbau wurde als agiles Testlabor verstanden. Wiederkehrend wurden die erfassten Daten analysiert, Maßnahmen in Bezug auf die Aussteuerung des Midi-Interface, die Einstellung der Aufnahmeparameter und die Speicherung der Schalldaten vorgenommen.



Abbildung 15: Aufbau des 1. Prototyps – technischer Test

Neben den wiederkehrenden, unterschiedlich lang dauernden Phasen mit fortlaufenden Aufnahmen wurde im Herbst 2024 ein Reallabor eingerichtet, bei dem Testfahrten unter definierten Bedingungen durchgeführt wurden. Für den Einsatz im Reallabor am Gleis mit vorhandenem Stromanschluss wurde als Feldversuch mehrere Testfahrten mit und ohne Schadwagen von zwei Zügen durchgeführt und gemessen. Die Ergebnisse wurden mit einer Software ausgewertet und im Projektteam bewertet.

Die Ergebnisse des Feldtestes sind in der folgenden Abbildung als Frequenzgrafiken dargestellt.

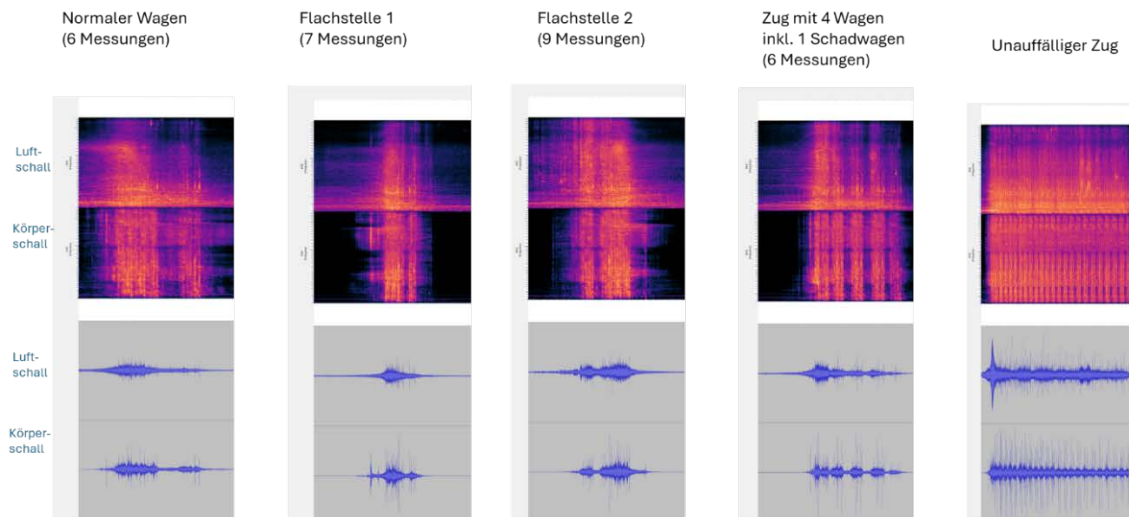


Abbildung 16: Frequenz-Grafiken der Aufnahmen von den Testfahrten mit und ohne Flachstellen (Beispiele) mit Luftschall und Körperschall

In der Abbildung können die Achsen visuell erkannt werden. Z.B. bei der Aufnahme des Zuges mit vier Wagen und dem unauffälligen Ganzzug sind die Achsen deutlich zu erkennen. Bei den Einzelwagenaufnahmen sind Lok und einzelner Wagen gut zu unterscheiden.

Bei dem Test der verschiedenen Sensortypen sind die Luftschallmessungen deutlich verschwommener als die Körperschallaufnahmen, mit ähnlichen Amplituden bei der Auswertung. Luftschall- und Körperschall liefern vergleichbare Messergebnisse, die Sauberkeit der Schallmuster beim Körperschall ist besser und die Störsensitivität ist geringer. Ein weiterer Faktor ist, dass der Energieverbrauch durch die Fokussierung auf eine Eingangsquelle geringer ist. Für weitere Messungen wird nur noch ein Körperschallsensor verwendet.

Allerdings konnte an den Aufnahmen keine eindeutige Identifikation der Schadwagen über die Amplituden oder visuellen Darstellungen erfolgen. Dies wurde bereits erwartet, da die Aufnahme in der Nähe einer Weiche und eines Stoßgleises erfolgt. Dadurch überlagern die infrastrukturbedingten Geräusche die flachstelleninduzierten Geräusche. Ein Einsatz an einem geeigneten Gleis wird im nächsten Schritt angegangen.

Zentrale Erkenntnisse und Ableitungen aus der beschriebenen ersten Testreihe waren, dass Luft- und Körperschallsensoren vergleichbare Aussagen in Hinblick auf Auffälligkeiten liefern, die auf Schäden wie Flachstellen und Aufschweißungen an den Wagenrädern hindeuten. Die Klangmuster, die über den Körperschallsensor geliefert werden, sind dabei klarer und rauschfreier. Daher wurde als Konsequenz für die weitere Entwicklung und Anwendung festgelegt, dass der Körperschallsensor als Quelle ausreichend ist.

Der beschriebene Aufbau der ersten Testreihe zeigte aber auch, dass Störgeräusche durch Stellen mit Übergängen oder Weichen eine Identifikation von möglichen Anomalien massiv stören. Daher wurde für den folgenden Feldversuch seitens duisport rail nach einer geeigneten Stelle gesucht, die sowohl infrastrukturell besser ist als auch die Relevanz in Bezug auf die WTU hat. Nach der Identifikation des

passenden Ortes wurden dort dann Aufbereitungen bezüglich der Gleisbeschaffenheit und des Schotterbetts neben dem Gleis vorgenommen.

Eine andere, wenngleich für die Intention der WTU-Unterstützung nicht zielführende Erkenntnis war, dass durch die oben genannten Störgeräusche andere Aussagen wie eine Achszählung möglich wären.

### 1. Autarke Lösung - Technische Entwicklung des 2. Prototyps

Für den zweiten Prototyp für den Realeinsatz ergaben sich neue bzw. geänderte Anforderungen zur Entwicklung durch die Erkenntnisse aus dem ersten Test:

- I) Mind. 50 m Abstand von Störgeräuschquellen (Weichen, Kurven, Schäden, Schweiß- oder Stoßstellen am Gleis, geschraubte Verbindungen) → Autarke Einheit ohne WLAN am geplanten Ort
- II) Nur Körperschallsensor

Der zweite Prototyp wurde daher als autarke Schall-Sensorik-Box zum Erkennen möglicher Radsatzschäden (Flachstellen) umgesetzt. Diese ist gekennzeichnet durch die

- Gewährleistung der autarken Energieversorgung mittels Solarpanel und Puffer-Akku,
- Mobilkommunikationsmodul mit Datenmobilfunkkarte (eine alternative WLAN-Fähigkeit liegt vor, ein geeignetes zugängliches Wifi-Netz ist am Aufstellort nicht verfügbar) und
- Deziidiert entwickelte Stahlrahmenkonstruktion, die alle Komponenten inklusive Solarpanel aufnimmt und eine für den Einsatzort und -zweck geeignete Robustheit bietet.

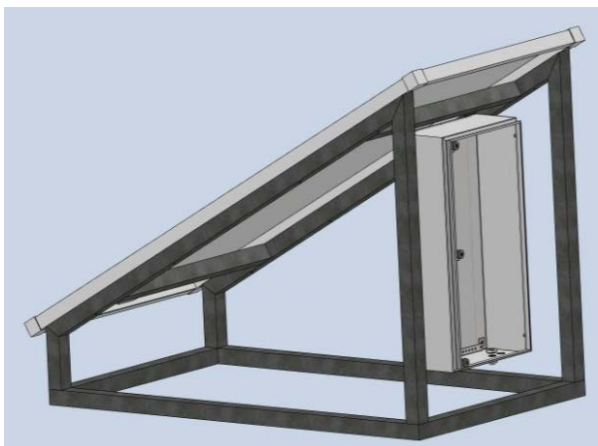


Abbildung 17: Technische Zeichnung der Schall-Sensorik-Box

Die Schallerfassung wurde auf den Körperschall(sensor) als Eingangsquelle reduziert, da die Erfahrungen aus dem 1. Techniktest zeigten, dass Luftschall- und Körperschall gesichert vergleichbare Messergebnisse liefern, die Sauberkeit der Schallmuster beim Körperschall besser ist und die Störempfindlichkeit geringer ist sowie der Energieverbrauch durch die Fokussierung auf eine Eingangsquelle geringer ist.

Die freistehende Schall-Sensorik-Box erfordert einen sicheren Stand in der Nähe der Gleise sowie eine Energiequelle für die Datenverarbeitung. Eine Verlegung neuer Stromzugänge im Gleis wurde als nicht

im Projektzeitraum realisierbar verworfen, denn im Gleisbereich sind besonders hohe Anforderungen für eine Neuverlegung von Kabeln zu beachten, die zeitlich und wirtschaftlich nicht abbildbar waren. Daher wurde eine autarke Energieversorgung mit Integration von Solarpanelen verbaut. Die freistehende Schall-Sensor-Box besteht nun aus einer massiven Bodenkonstruktion aus Stahl, einem Solarpanel und einer Elektronikbaukasten zur Auswertung und Weitergabe der Daten des Körperschallsensors

In mehreren Sprints wurde der Prototyp in den Laboren des Fraunhofer IML getestet und angepasst. Nach den erfolgreichen Labor-Tests zu xxx (Welche Test wurden im Detail durchgeführt)

## 2. Prototypischer Test der freistehenden Lösung

Von November 2024 - Mai 2025 wurde der freistehende Prototyp der Schall-Sensorik-Box im Werksgelände des Hafens Duisburg getestet.

Es konnte ein geeigneter Standort genutzt werden mit

- Ausreichend große und ebene Frei-Fläche für das Aufstellen der Schall-Sensorik-Box in Gleisnähe
- Mind. 50 m Abstand zu nächster großer Störgeräuschquelle im Gleis
- Frisch gewartete Gleise zur Minimierung der allgemeinen Störgeräusche



Abbildung 18: Schall-Sensorik-Box Rückansicht mit Solarpanel



Abbildung 19: Schall-Sensorik-Box Vorderansicht mit Kontrollschrank





*Abbildung 21: Körperschallsensor von außen am Gleis mit Magnethaftung; Anbindung an die Schall-Sensorik-Box über Kabel*

*Abbildung 20: Blick auf den inneren Aufbau im Kontrollschrank der Schall-Sensorik-Box*

Die zugrundeliegende Datenerhebungs- und -auswertungssoftware wurde implementiert. Basierend auf den Einsatzerfahrungen, Datenqualitäten und Störungen wurden in mehreren Entwicklungssprints Anpassungen und Verbesserungen vorgenommen. Für die Analyse der Schalldaten werden mit Mustererkennungsverfahren typische wiederkehrende Amplituden gesucht und darauf basierend Hinweise für die Wagenmeister abgeleitet. Mit den erfassten Schalldaten wurden weitere Typisierungsanalysen durchgeführt.

Technische Probleme ergaben sich an sonnenarmen Tagen mit der Energieversorgung und der damit verbundenen Datenübertragung. Es gab keine Probleme mit Vandalismus, Feuchtigkeit oder mit der physischen Konstruktion.

In der Auswertung der Daten bestätigte sich die Annahme, dass der Körperschall ausreichend Daten erfasst. Die Aufzeichnung wurde zuverlässig gestartet, sobald ein Zug vorbeifuhr und hat keine externen Geräusche irrtümlich als Zug erkannt.

Aufgrund der unterschiedlichen Erkenntnisse zum Reifegrad und zur Tauglichkeit des gewählten Lösungsansatzes im tagtäglichen Einsatz im Bahnbetrieb, auch unter extremeren Wetterbedingungen wurde der Feldtest verlängert. Damit können Erfahrungen zum Nutzen für und zur Akzeptanz beim Wagenmeister gewonnen und eine breitere und klassifizierte Datenbasis für die Nutzung von Schallsensorikdaten geschaffen werden, die für eine Entwicklung von KI-Verfahren zur Flachstellendetektion dienlich ist.

Bei der Identifikation von Schadwagen mit Flachstellen konnten einige verdächtige Aufnahmen von der Software und von erfahrenen Wagenmeister als Flachstellen identifiziert werden, die trotz der geringen Geschwindigkeit von < 25km/h im Werksgelände die für Flachstellen typische Schlaggeräusche aufweisen.

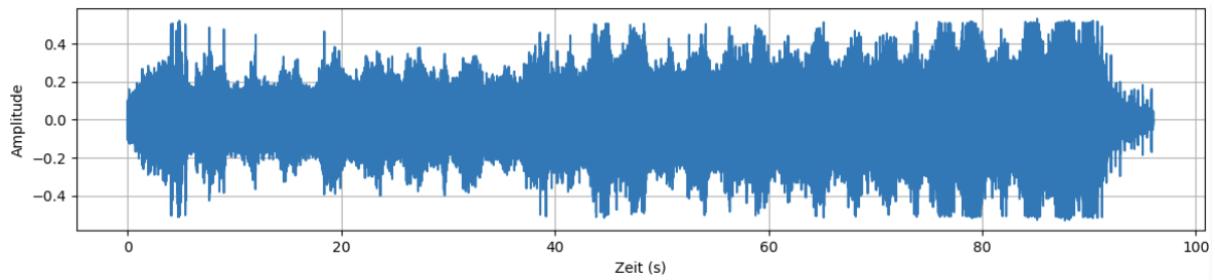


Abbildung 22: Beispielhafte Darstellung der Schallamplitude eines Zuges (mit Körperschallsensor erfasst)

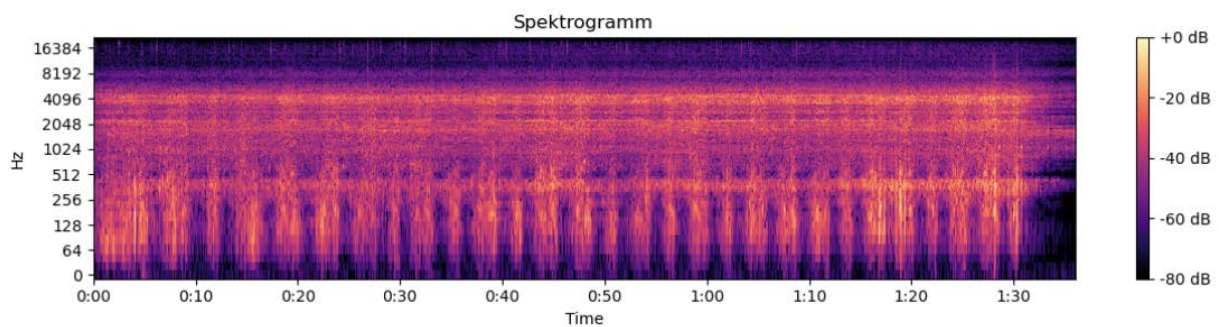
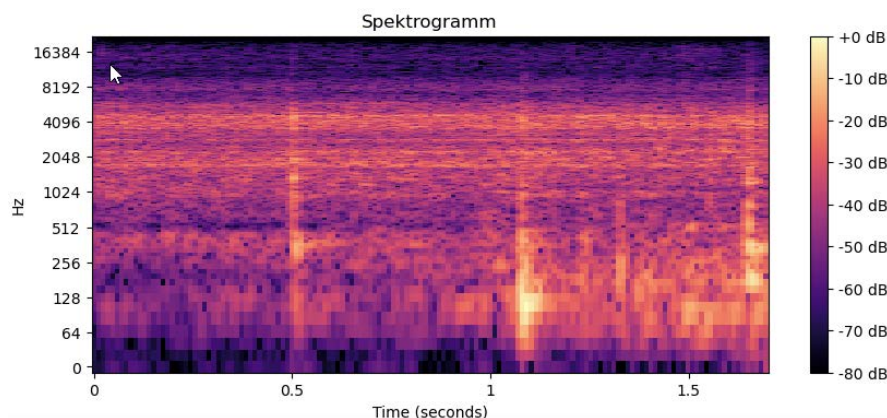


Abbildung 23: Beispielhafte Darstellung des Spektrogramms der Schallmessung eines Zuges (mit Körperschallsensor erfasst)

Für die Identifikation von Flachstellen Aufschweißungen wurden die Faktoren Regelmäßigkeit, Dauer und Spitzenamplitude des Schlages bzw. genauer seines Schallsignals und die Frequenz verwendet. Genauer ist dies in Kapitel 1.3.3 beschrieben. Eine Visualisierung der dafür über den Körperschallsensor erfassten Schalldaten findet sich in Abbildung 21 (Schallamplitude) und Abbildung 22 (Spektrogramm).



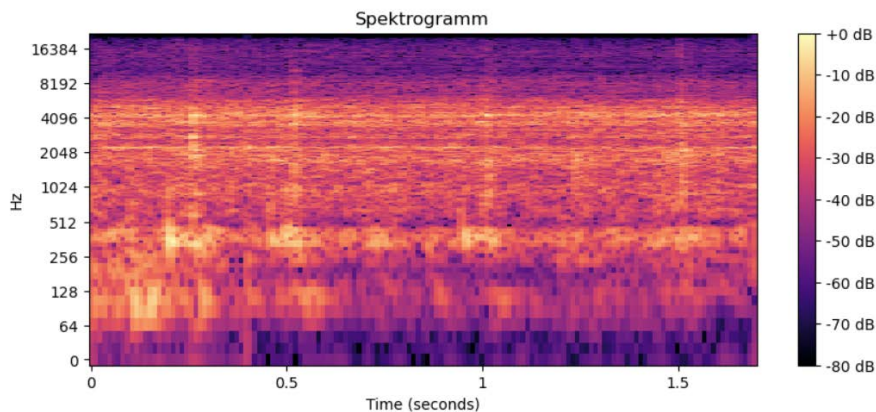


Abbildung 24: Zwei Beispiele für Spektrogramm-Grafiken der Aufnahmen von Zügen mit Flachstellen

Das Analyseverfahren ist in der Lage, die charakteristischen Merkmale möglicher Flachstellen und Aufschweißungen mit einer hohen Sicherheit zu erkennen. Die Voraussetzung dafür sind allerdings gleichmäßig fahrende Züge. Wenn die Züge im Bereich des Messpunktes bremsen müssen, so entstehen während des Bremsvorgangs oftmals Schallmuster, die denen von Schadstellen gleichen. Hier besteht folglich noch Bedarf zur Verbesserung des Verfahrens. Ein naheliegender Ansatz ist das ergänzende Herausfiltern typischer Muster, die für einen Bremsvorgang sprechen. Dieses wurde im Rahmen von DIANA allerdings nicht mehr angegangen.

Zur Entwicklung eines KI-basierten Ansatzes zur Datenauswertung und Interpretation der Schalldaten zur Identifikation von Schadstellen wurde ein Python-Script erstellt, das jedoch aufgrund eines zu geringen Umfangs an verifizierten Trainingsdaten nicht zu einem gesicherten Modell entwickelt werden konnte. In der weiteren Nutzung kann das Verfahren jedoch lokal mit historischen Daten, d.h. Daten, die im Verlauf der Prototypenphase mit dem freistehenden Sensorik-Box erhoben wurden, weiter trainiert werden. Zudem sollen Schalldaten aus anderen Aufstellort- und Messkonstellationen hinzukommen.

Im Zeitraum der Vor-Ort Aufnahmen konnten Schadwagen mit Flachstellen identifiziert und für Trainingszwecke verwendet werden. Dabei wurden sowohl elementare Flachstellen herausgefunden, die zu einer direkten Reaktion des Wagenmeisters führen würden, als auch solche, die zwar im Workshop mit Wagenmeistern als charakteristisch richtig bestätigt wurden, aber keine Konsequenz im Rahmen der WTU nach sich ziehen würde. Daher wäre an dieser Stelle ein sicheres KI-Verfahren in der vorgenannten Weise hilfreich, um, vergleichbar einer Ampel, eine Gewichtung der Schadensbeschaffenheit automatisiert ausweisen könnte.

Insgesamt wurden im Rahmen der Prototypen-Testphase folgende Arten der direkten Nutzbarkeit der rohen sowie der ausgewerteten und interpretierten Schalldaten ausgemacht:

1. Aufnahmen durch Wagenmeister direkt prüfen

Mit der Schall-Sensorik-Box kann bereits jetzt jede Aufnahme in Echtzeit abgerufen werden (nur Züge wurden als „Aufnahme“ identifiziert). Dies kann über einen Weblink zum System oder eine direkte Einbindung an eine Software erfolgen. Dadurch kann der Wagenmeister im Vorfeld der WTU oder bei der Wageneingangsuntersuchung diese sortiert anhören, z.B. während seines Ganges

zum Gleis oder noch im Büro, um frühzeitig Maßnahmen bei einem Flachstellenverdacht einleiten zu können.

## 2. Speicherung der Daten für Nachweis im AVV-Bereich

Als zweite direkte Nutzungsmöglichkeit, werden die Aufnahmen gespeichert und können bei Bedarf abgerufen werden, um z.B. die Haftungsfrage gemäß AVV bei später identifizierten Flachstellen klären zu können.

In der Folgenutzung des Prototyps sind folgende Punkte zu empfehlen:

- Anbindung an TOS: Im internen IT- System erleichtert eine direkte Verknüpfung der Zugaufnahmen mit den Zugnummern aus dem Hafenen internen TOS und dem Railgate die Zuordnung der Wagen zu den Zügen. Bisher liegt zum Nachweis nur die Uhrzeit der Aufnahme vor.
- KI-Training: Eine Aufnahme größerer Mengen von über 100 Schadwagen mit Flachstellen sind nötig, um die genutzte KI genauer zur Identifikation der Flachstellen trainieren zu können und damit spezifischere Meldungen an den Wagenmeister geben zu können.
- Weitere Testreihen an verschiedenen Gleisen zum Berücksichtigen der Störquellen in der Auswertung erhöhen die Einsatzmöglichkeiten
- Testreihe mit Flachstellen >600 mm und <600 mm zur Vermeidung von Fehlmeldungen noch nicht relevanter Flachstellen
- Miniaturisierung des Aufbaus für leichteren Transport und geringeren Energiebedarf.

### Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr (SGKV) e.V.

Im AP 4 übernahm die SGKV die Federführung für die Planung und Vorbereitung der Feldversuchsphasen (AP 4.1). Sie entwickelte Testdesigns, Ablaufpläne und Messkonzepte und stimmte diese mit den Praxispartnern an den Standorten Duisburg und Lübeck ab. Auf dieser Basis wurden zunächst Feldversuche 2023 und anschließend zwei weitere WTU-App-Feldtests im Jahr 2024 in Lübeck vorbereitet, bei denen die weiterentwickelte App unter Realbedingungen erprobt wurde. Die SGKV koordinierte die Auswahl geeigneter Züge, die Einbindung der Wagenmeister, die Datenerhebung (z. B. Zeiten, Fehlerbilder, Nutzerfeedback) und die Dokumentation der Ergebnisse. Darüber hinaus war sie an der Planung der Testreihen zur akustischen Schadwagendetektion beteiligt, insbesondere hinsichtlich der Festlegung von Messzielen, Parametern und Anforderungen an den Aufbauort der Sensorik (Gleiszustand, Energieversorgung, Sicherung des Aufbaus). Im Zuge der Umstellung auf eine autarke Energieversorgung mit Solarpanel begleitete die SGKV die Verlagerung des Messorts und bewertete die Auswirkungen auf die Testdurchführung. Die in den Feldversuchen und Tests gesammelten Erfahrungen wurden von der SGKV strukturiert aufgearbeitet und flossen in die nachfolgenden Validierungs- und Optimierungsschritte ein.

## 1.6 AP 5 Validierung und Rekursion

Die im Zuge der Entwicklungen (AP3) und der verschiedenen, damit verbundenen Testphasen (AP4) durchgeführten Tests wurden – unter dem Blickwinkel der in AP2 definierten Maßnahmen und zugrundeliegenden Beurteilungskriterien – hinsichtlich ihrer Praktikabilität und Zielerreichung begleitet und ausgewertet. Dabei stand zuerst die Rückkopplung mit der Software- und Sensorikentwicklung im Vordergrund zur Optimierung der Software und der Praxistauglichkeit und Einfachheit der Handhabung der Lösungsansätze, welche direkt integriert wurden. Die finale Bewertung der Zielerreichung anhand der aufgestellten Kennzahlen wurde im letzten Projektjahr erstellt. Im Folgenden sind die zentralen Bewertungen dargestellt.

Bezugnehmend auf die vier zentralen Arbeitsziele (vgl. Kapitel 1.2 und 1.1.2) wurden im Projekt folgendes erreicht

1. Entwicklung einer Softwarelösung für die WTU  
Im Laufe des Projektes wurde eine WTU-Softwarelösung entwickelt, die WTU App (s. Kapitel 1.3) inkl. einer Wagennummern-Erkennung und einer Sprachsteuerung.
2. Einbindung innovativer mobiler Ein- und Ausgabegeräte (Devices)  
Bei der Auswahl der Devices wurden mehrere Tests mit Wagenmeister durchgeführt, die die WTU-App auf den mobilen Ein- und Ausgabegeräten Smartphone, Tablets und einer Datenbrille getestet haben (s. Kapitel 1.4.3)
3. Identifikation und Integration wichtiger Datenschnittstellen  
Die wichtigen Datenschnittstellen wurden in Kapitel 1.2.1 herausgearbeitet und so weit wie möglich in die beiden Prototypen integriert bzw. deren Integration vorbereitet.
4. Integration von Sensordaten  
Die Sensordaten der Schall-Sensorik wurden zur Integration in andere Systeme vorbereitet.

Für die entwickelten Prototypen und technischen Teilsysteme wurde im Laufe des Projektes der Technology Readiness Level (TRL) verwendet, um den Entwicklungsstandes der neuen Technologien auf der Basis einer systematischen Analyse darzustellen. Implizit wurde davon ausgegangen, im Laufe des Projektes lauf- und demonstrationsfähige Prototypen zu entwickeln, aus denen im Erfolgsfall marktaugliche Hard- und Softwarelösungen entstehen können. Dies entspricht einem Ziel-TRL von 5 (Technologiedemonstration in relevanter Umgebung: Anwendung des Konzepts in einer realistischen Umgebung) bis 6 (Technologiebewertung: Kommerzielle Anwendungen und technische Machbarkeit werden evaluiert) für die einzelnen technologischen Teilsysteme.

Technologisches Teilsystem	TRL bei Projektstart	TRL bei Projektende
1 WTU-App	1	6 (Technologiebewertung)
2 Wgnr.- Erkennung	3	5 (Technologiedemonstration)
2 Datenbrille	3	5
2 Sprachsteuerung	3	5

4	Schall Sensorik	3	6
4	Datenanalyse (Schalldaten -> Schaden)	2	5

In der folgende Grafik sind die Ziele, die im Vorfeld des Projekts zur Messbarkeit des Projekterfolgs festgelegt wurden, den Ergebnisse des Projekts gegenübergestellt:

Ziele im Projekt	IST	SOLL	Bei Prototypen-Test
<b>übergeordnete Ziele</b>			
Durchschnittlich benötigte Zeit zwischen fertiger Beladung und Zugausgang	ca. 200 min	Reduktion um 10 % bzw. mind. 30 Minuten pro Zug + Reduktion der Zeit für Schadwagenaustausch durch Reduzierung der Schadwagenquote während der WTU um 90 % (Eingangskontrolle)	erfüllt, wenn Einbindung in Bahndispositionssystem  System zur Schadwagenerkennung nur prototypisch ohne Anbindung an Bahndispositionssystem getestet
Digitale (Echtzeit-)Kommunikation des Wagenmeisters mit dem Terminal und ggf. weiteren Akteuren	nein	Ja	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ja, Demonstration des Sendens der Daten an Bahndispositionssystem</li> <li>• Vorbereitung des Sendens des Prüfberichts am Zug</li> <li>• Vorbereitung der Integration der Wagenliste in die App</li> </ul>
<b>Wagentechnische Untersuchung</b>			
Durchschnittlich benötigte Zeit zwischen Start der WTU und Versand des Prüfberichts	ca. 3 Std.	Reduktion um 10 % bzw. mind. 30 Minuten pro Zug	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ja, durch Prüfberichtsversand am Zug &amp; Import der Zugdaten in die WTU-App</li> <li>• Weitere Einsparung durch potenzielle Schadwagenausortierung</li> </ul>
Einbindung innovativer mobiler Ein- und Ausgabegeräte (Devices)	nein	ja	Ja, in zwei getrennten Tests (Tablet, Handy, Datenbrille)
Prüfung der Nutzung von Informationen aus dem TOS oder anderen Quellen für die WTU (vorausgefüllte Felder)	nein	ja	Ja, Bahndispositionssystem leoRail und Smart Wagon Inspector (Open Source-Entwicklung im Rahmen des Forschungsprojekts Silicon Economy)
Prüfung der (Echtzeit-) Kommunikation mit TOS und / oder EVU während der Berichtserstellung am Zug	nein	ja	Ja, vorbereitet, im Rahmen des Projekts nicht umgesetzt
<b>Schadwagendetektion</b>			
Echtzeitkommunikation mit TOS und / oder EVU	nein	ja	ja, vorbereitet, im Rahmen des Projekts nicht umgesetzt
Schadwagenquote während der WTU (durch innovative Eingangskontrolle)	1%	Reduktion Schadwagenaustausch während WTU um ca. 90 %.	Nein, System zur Schadwagenerkennung nur prototypisch ohne Anbindung an Bahndispositionssystem getestet mit geringer Anzahl an gelabelten Testdaten.
Automatische Schadwagendetektion bei Zugaufgang	nein	ja	vorbereitet

Abbildung 25: Kennzahlenbewertung der Projektziele

### ***Durchschnittlich benötigte Zeit zwischen fertiger Beladung und Zugausgang***

Der Sollwert konnte erreicht werden. Durch die Echtzeitkommunikation der Wagenmeister-App kann direkt am Ende der WTU der Prüfbericht und die Freigabe des Zuges versandt werden, wenn es im eigenen TOS-System integriert ist. Dadurch werden ca. 30 Min. Zeit eingespart, der vor Projektbeginn aus dem Rückweg vom Zug zum Büro und der Übertragung der manuellen Papierprüfberichts in das Software-System bestand.

Für die Schadwagenquote wurde das übergeordnete Ziel nur theoretisch erreicht, da für die praktische Anwendung noch die Bereitstellung und Integration der Wagenlisten fehlten. Unter der Voraussetzung der digitalen Bereitstellung der Wagenliste kann in den Fällen, in denen auszusetzende Schadwagen im Zugverbund sind, der Zielwert erreicht werden.

### ***Digitale (Echtzeit-)Kommunikation des Wagenmeisters mit dem Terminal und ggf. weiteren Akteuren***

In der App wurde technisch vorbereitet, dass eine (Echtzeit-)Kommunikation des Wagenmeisters über die App mit anderen Systemen stattfinden kann. Eine Anbindung an diese Systeme hat im Regelbetrieb nicht stattgefunden.

### ***Durchschnittlich benötigte Zeit zwischen Start der WTU und Versand des Prüfberichts***

Der Beginn des Erstellens des Prüfberichts mit Abschluss der WTU kann durch die mobile Weitergabe der WTU-Daten in Echtzeit direkt erfolgen und eine Ersparnis in der genannten Größenordnung (SOLL-Wert) erzielt werden.

### ***Einbindung innovativer mobiler Ein- und Ausgabegeräte (Devices)***

Im Forschungsprojekt wurde gezeigt, dass prinzipiell ein Einsatz von Devices wie Datenbrillen mit Sprachsteuerung möglich ist. Für die Umsetzung der mobilen Lösung für die WTU wurden allerdings unter Berücksichtigung äußerer Einflüsse wie dem Wetter und unter Arbeitsschutzaspekten einfachere Device wie robuste Smartphone oder Tablets verwendet.

### ***Prüfung der Nutzung von Informationen aus dem TOS, dem Bahndispositionssystem oder anderen Quellen für die WTU***

Das Einbeziehen verschiedener Quellen wurde systematisch untersucht, ein direktes Nutzen der Daten konnte aber nur für die Wagenliste verschiedener EVU exemplarisch gezeigt werden. Zudem wurde mit einer Sensorik-Box für Schalldaten möglicher Schäden an den Rädern eine neue Quelle entwickelt.

### ***Prüfung der (Echtzeit-)Kommunikation mit TOS und / oder EVU während der Berichtserstellung am Zug***

Prüfberichte und weitere Daten, die nach der WTU in der WTU-App bereitstehen, können über das jeweilige Bahninformationssystem in Echtzeit für damit verbundene TOS oder EVU-Systeme bereitgestellt werden.

### ***Echtzeitkommunikation mit TOS und / oder EVU***

Daten, die in das jeweilige Bahninformationssystem hineinlaufen, können darüber in Echtzeit über die WTU-App dem Wagenmeister zur Verfügung gestellt werden.

### ***Schadwagenquote während der WTU (durch innovative Eingangskontrolle)***

Ein expliziter Nachweis für die Verringerung der Schadwagenquote während der WTU konnte nicht erbracht werden. Der prototypische Test zeigte spannende und nützliche Erkenntnisse. Für einen wirtschaftlichen Einsatz ist noch eine Anbindung an das Bahndispositionssystem und OCR Gate System zu erfolgen, um die Wagenliste zuzuordnen und aktive Warnungen an den Wagenmeister schicken zu können. Dies ist nach dem geprüften Konzept möglich.

Hier gilt weiterhin die Annahme, dass eine gute Unterstützung der Wagenmeister die Fehlerquoten geringhält und dies sich positiv auf die Schadwagenquote wirkt.

### ***Automatische Schadwagendetektion bei Zugeingang***

Es erfolgte keine pauschale Detektion von allen Schadwagen beim Eingang der Züge, sondern speziell nur Schadwagen mit Flachstellen an Rädern. Dies ist ein wichtiges Instandhaltungskriterium und ein mitunter während der WTU schwierig zu erkennender Schaden. Eine automatische Detektion von Flachstellen an Rädern wurde mit der Schall-Sensor Box in der realen Umgebung getestet und kann weiterverwendet werden. Dies erzielt jedoch nur direkte wirtschaftliche Effekte, wenn das System an das hausinterne System angebunden werden kann, um aktiv die Wagenmeister zu informieren.

Ein weiterer wirtschaftlicher Nutzen ergibt sich nachgelagert durch die Dokumentation des Schadens bei Einfahrt des Zuges. Hier kommen durch die Regeln des AVV zum Tragen, dass der Verursacher des Schadens einer Flachstelle diesen zu bezahlen hat. Nimmt der Wagenmeister den Wagen an, ohne den Schaden direkt bemerkt zu haben, geht der AVV davon aus, dass der Schaden auf dem Werksgelände entstanden ist und der Folgenutzer stellt diesen in Rechnung. Die Schall-Aufnahme dient damit zum Nachweis, dass der Schaden vor Einfahrt in das Werksgelände entstanden ist. Dies führt zu einer Einsparung von ca. 3.000 € bis zu 10.000 € pro Forderung.

## **1.6.1 Optimierung und Finalisierung Software**

Die Optimierung der Software fand während der Entwicklungs- und der Testphase durch iterative Verbesserungsschleifen statt. Gestartet hat die Optimierung schon vor dem ersten Feldversuch auf Grundlage von Rückmeldungen durch die Wagenmeister. Der fortlaufende Optimierungsprozess erstreckte sich dann über die Feldversuche hinweg bis zum Abschluss der Entwicklung.

Das Feedback durch die Endanwender betraf im Allgemeinen vor allem die Usability und das Design der Anwendung, sowie kleinere Anpassungen am Prozess Workflow.

Die geforderten Anpassungen wurden in der App durchgeführt und in die Spezifikation eingearbeitet.

Im Anschluss an das Projekt soll die WTU-App dann zu einem kommerziell nutzbaren Produkt weiterentwickelt werden. Dies umfasst vor allem die Fertigstellung von Schnittstellen (insbesondere das Versenden des Prüfprotokolls).

## Dokumentation wirtschaftlicher Effekte des Verkehrsträgers Schiene

Es ergeben sich durch die Optimierung der WTU verschiedene wirtschaftliche Effekte für den Verkehrsträger Schiene, die in den Feldtests ermittelt wurden (vgl. 1.5.1).

Die Nutzung einer WTU-App in direkter Anbindung an das hauseigene Bahninformationssystem ermöglicht eine ganzheitliche Digitalisierung und Vernetzung innerhalb eines Gleisanschlusses oder eines Hafens mit allen notwendigen Daten.

Der Effekt der Vermeidung von Medienbrüchen durch die App kann die WTU-Dokumentation direkt am Ende des physischen Ablaufs abgeschickt werden und spart damit den Weg vom Gleisende zum Wagenmeisterbüro, was den Prozess bis zu 30 Min. beschleunigen kann. Des Weiteren spart die direkte Eingabe Arbeitszeit und Fehler, die bei der nachgelagerten Digitalisierung der Notizen zur WTU durch den Medienbruch entstehen können. Hier ist der wirtschaftliche Effekt jedoch nur relevant, wenn diese Person die ersparte Zeit an einer anderen Stelle sinnvoller einsetzen kann und der Fahrplan gestrafft werden kann. Die wirtschaftliche Bedeutung ist hoch, da in Deutschland jeden Tag insgesamt ca. 5.400 Güterzüge gefahren werden<sup>5</sup>. Gelingt es, bei jedem dieser Züge 30 Minuten je WTU einzusparen, wird eine theoretische Reduktion von täglich ca. 2.700 Stunden möglich.

Weitere Einsparungseffekte ergeben sich durch den Einsatz weiterer Sensoren, die dem Wagenmeister zur Verfügung gestellt werden können. Als zweiter wirtschaftlicher Effekt ergibt sich durch die Detektion und Dokumentation einer Flachstelle durch die Schall-Sensor-Box, die eine unberechtigte Kostenforderung abwenden kann. Bei einer möglichen Einsparung von ca. 3000 - 10.000 € pro unberechtigte Forderung werden die Kosten des Systems, das bewusst auf wenigen günstigen Komponenten basiert, zügig amortisiert. Der Schaden wird dann von dem Verursachenden übernommen. Das spart dem Gesamtsystem Schiene keine direkten Kosten, allerdings ist die Haftungsfrage vor allem bei Flachstellen ein großer Streitpunkt im Rahmen des AVV und trägt durch eine korrekte Zuweisung zur Beilegung vieler Konflikte bei, das über den Einzelfall hinauswirken kann.

Die Akzeptanz der neuen Techniken bei den Test-Wagenmeister war z.B. bei der WTU-App hoch. Auch die Datenbrille wurde als interessante Technik angesehen. Dies gilt nicht für alle Teilnehmenden, daher muss hier eine Umstellung in enger Abstimmung mit den Nutzenden erfolgen. Es zeigte sich jedoch deutlich, dass Neuerungen, digitale Unterstützung von einigen sehr gerne angenommen wurde. Dies trägt zu einem modernen Berufsbild des Wagenmeisters bei und wirkt dem starken Personalmangel bei der jüngeren Generation.

### Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr (SGKV) e.V.

Im AP 5 unterstützte die SGKV die Validierung der im Projekt erzielten Ergebnisse und deren Rückkopplung in die Weiterentwicklung von Software und Sensorik. Gemeinsam mit Fraunhofer IML und den Praxispartnern wirkte sie an der Konkretisierung der Bewertungs- und Kennzahlenlogik mit, die bereits in AP 1 vorbereitet worden war, und brachte ihre Kenntnisse zu Prozesszeiten, Schadwagenquoten und Informationsflüssen ein. Auf dieser Grundlage beteiligte sich die SGKV an der

---

<sup>5</sup> Vgl. DIANA-Vorhabenbeschreibung S. 10

Auswertung der Feldversuche zur WTU-App und der Sensoriktests, insbesondere mit Blick auf qualitative Kriterien wie Prozessqualität, Transparenz, Nutzerakzeptanz und organisatorische Auswirkungen auf die Abläufe in KV-Terminals. Zudem ordnete sie die technischen Ergebnisse in einen wirtschaftlichen und verkehrspolitischen Kontext ein, indem sie Potenziale für Effizienzgewinne, Kosteneinsparungen und Verlagerungseffekte zugunsten des Schienengüterverkehrs herausarbeitete. Die SGKV wirkte an der Aufbereitung der Validierungsergebnisse für den Schlussbericht und für weitere Transferformate (z. B. Leitfäden, Präsentationen) mit und formulierte gemeinsam mit den Partnern offene Punkte, die für die Skalierung, Systemintegration und Weiterentwicklung in Anschlussprojekten relevant sind.

## **1.7 AP 6 Projektmanagement und Kommunikation**

Das Projekt DIANA wurde über die gesamte Laufzeit hinweg durch ein strukturiertes und kooperativ ausgerichtetes Projektmanagement begleitet. Die enge Verzahnung technischer Entwicklung, betrieblicher Anforderungen und organisatorischer Abstimmung war entscheidend für den Projekterfolg – insbesondere in der Phase der praktischen Erprobung und Validierung der entwickelten Lösungen.

### **Projektkoordination und Managementstruktur**

Die SGKV übernahm die Projektkoordination und verantwortete sowohl die organisatorische Steuerung als auch die inhaltliche Abstimmung zwischen den Konsortialpartnern. Zum Projektmanagement gehörten unter anderem die Planung und Moderation der zweiwöchentlichen Jour-Fixe-Webmeetings, die Organisation interner Workshops zur technischen Abstimmung und Feldversuchsplanung sowie die kontinuierliche Dokumentation von Ergebnissen und Schnittstellenfragen. Darüber hinaus koordinierte die SGKV die kostenneutrale Projektverlängerung bis Juni 2025 in enger Abstimmung mit dem Projektträger.

Durch diese strukturierte Vorgehensweise konnte ein transparenter Informationsfluss gewährleistet und offene Fragen – etwa zu standortbezogenen Abhängigkeiten, technischen Anpassungen oder externen Maßnahmen – frühzeitig geklärt werden.

### **Interne Kommunikation und Arbeitsweise**

Im Projekt wurde eine iterative und agile Arbeitsweise verfolgt, insbesondere im Arbeitspaket 3 zur Softwareentwicklung. Hier kam ein Scrum-Ansatz mit zweiwöchigen Sprints zum Einsatz, in deren Rahmen die Anforderungen an die WTU-App im Konsortium priorisiert und schrittweise umgesetzt wurden. Ergänzend zur agilen Entwicklung gab es eine enge operative Abstimmung, die sich in kurzfristigen technischen Besprechungen, gemeinsamen Vor-Ort-Terminen – beispielsweise zur Installation der Sensorik in Duisburg – sowie einer direkten Rückkopplung mit dem Prüfpersonal zeigte. Nutzerfeedback wurde systematisch erfasst und ausgewertet, sodass Anpassungen unmittelbar in die Entwicklung einfließen konnten. Auf diese Weise konnte etwa die App-Oberfläche anhand von Hinweisen der Wagenmeister optimiert oder die Sensorikbox nachträglich technisch justiert werden.

## **Kommunikation nach außen und Dissemination**

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Kommunikation mit externen Zielgruppen. Hierfür koordinierte die SGKV verschiedene Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit, Fachkommunikation und des Ergebnistransfers. Das Projekt wurde auf zentralen Fachveranstaltungen wie dem TerminalTag in Berlin, der transport logistic in München, der InnoTrans in Berlin, der IHATEC-Vernetzungskonferenz des BMV sowie dem Zukunftskongress Logistik in Dortmund präsentiert. Ergänzend erschien ein Fachbeitrag im Bahn Manager Magazin, zudem stellte die SGKV das Projekt in branchennahen Netzwerken, Publikationen und Gremien vor.

Im Jahr 2023 fand ein Stakeholder-Workshop mit Vertreter:innen von Eisenbahnverkehrsunternehmen, Terminalbetreibern und Verbänden statt. Dabei wurden die bisherigen Ergebnisse vorgestellt und im Hinblick auf praktische Umsetzung, rechtliche Anforderungen und Datenschnittstellen diskutiert. Die Rückmeldungen flossen in die Weiterentwicklung der App-Funktionalitäten sowie die Planung der Feldversuche ein.

Zum Abschluss des Projekts wurde am 16. Juli 2025 eine öffentliche Veranstaltung durchgeführt, bei der die wichtigsten Erkenntnisse, Feldversuchsergebnisse und Handlungsempfehlungen vorgestellt wurden. Sie richtete sich an Fachpublikum aus dem Güterverkehrssektor, Technologieanbieter sowie weitere Interessierte. Abgerundet wurde die Kommunikation nach außen durch einen 3D-Animationsfilm, der die Projektergebnisse verständlich und kompakt visualisiert. Das Drehbuch entstand in enger Abstimmung im Konsortium und wurde durch einen externen Dienstleister umgesetzt.

### Studiengesellschaft für den Kombinierten Verkehr (SGKV) e.V.

Im AP 6 war die SGKV zentral in das Projektmanagement und die Kommunikation des Vorhabens eingebunden. Sie unterstützte die Konsortialführung bei der organisatorischen Steuerung des Projekts, plante und moderierte regelmäßige Jour-Fixe-Sitzungen im zweiwöchentlichen Rhythmus sowie mehrere Präsenz-Workshops zur Abstimmung der Arbeitspakete. Außerdem war sie für die strukturierte Dokumentation und Ablage von Zwischenergebnissen, die Zusammenführung von Beiträgen der Partner und die Erstellung der Zwischen- und Sachberichte gegenüber dem Fördermittelgeber mitverantwortlich. Hierzu gehörte auch die Vorbereitung und Begründung der kostenneutralen Verlängerung der Projektlaufzeit. Parallel dazu übernahm die SGKV wesentliche Aufgaben in der externen Kommunikation und Dissemination: Sie bereitete Fachbeiträge für Zeitschriften wie das Bahn Manager Magazin vor, berichtete regelmäßig auf der eigenen Website, in Rundschreiben und sozialen Medien über den Projektfortschritt und stellte Zwischenergebnisse in internen und externen Gremien sowie auf Veranstaltungen wie TerminalTag, InnoTrans und IHATEC-Vernetzungskonferenzen vor. Darüber hinaus koordinierte sie die Konzeption und Erstellung des 3D-Animationsfilms, einschließlich Drehbuchentwicklung und enger Abstimmung mit dem Unterauftragnehmer, und bereitete die Überführung der Projektergebnisse in dauerhafte Transferformate wie das E-Book und die KV-Mediathek vor.

## 1.8 Zusammenfassung und Ausblick

Während in vielen logistischen Bereichen, insbesondere im Hafen, digitale Prozesse bereits etabliert sind, ist die WTU in vielen Fällen noch stark manuell geprägt. Dies kann zu Verzögerungen und erhöhtem Aufwand führen. DIANA hat in diesem Kontext praxisorientierte digitale Lösungsansätze entwickelt und in enger Zusammenarbeit mit verschiedenen Projektpartnern – darunter duisport, Nordic Rail Service GmbH, leogistics GmbH, SGKV e.V. und das Fraunhofer IML – unter realen Bedingungen getestet.

Ein zentrales Element war die Entwicklung einer WTU-App. Sie ermöglicht unter anderem die digitale Bereitstellung von Wagenlisten, das Erfassen von Schäden nach AVV-Anlage 4, die Änderung der Wagenreihung sowie eine verbesserte Kommunikation zwischen den Beteiligten. Ergänzend dazu wurde der potenzielle Einsatz von Datenbrillen geprüft, um dem Wagenmeister eine freihändige Nutzung digitaler Informationen zu ermöglichen.

Darüber hinaus wurde eine Sensorbox entwickelt, die mithilfe akustischer Signale bestimmte Schäden, wie Flachstellen, identifizieren kann. Erste Tests mit Wagenmeistern im Reallabor deuteten darauf hin, dass solche Technologien in Zukunft eine ergänzende Rolle bei der Schadenerkennung spielen können. Die Sensorbox wird nun in dem Forschungsprojekt DIMI weiter getestet.

Das Projekt DIANA liefert erste Impulse, wie digitale Werkzeuge in der WTU sinnvoll eingesetzt werden können. Auch wenn noch weiterer Entwicklungs- und Abstimmungsbedarf besteht, zeigen die Ergebnisse, dass gezielte technologische Unterstützung zur Prozessverbesserung beitragen kann.

## **2 wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises (je Partner im eigenen Bericht)**

Die im Projekt angefallen Kosten bei der SGKV waren im Wesentlichen Personalkosten sowie ein kleinerer Betrag für den Unterauftrag der Erklärfilme.

## **3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die im Projekt DIANA geleisteten Arbeiten waren sowohl inhaltlich als auch methodisch notwendig, um die digitale Unterstützung der wagentechnischen Untersuchung praxisnah zu entwickeln und zu erproben. Die Kombination aus Prozessanalyse, technologischer Entwicklung, Standorttests und rechtlicher Bewertung war erforderlich, um die besonderen Rahmenbedingungen im Hafengebietenbereich angemessen zu berücksichtigen. Insbesondere der hohe manuelle Aufwand, die begrenzte Digitalisierungstiefe sowie die eingeschränkte Datenverfügbarkeit in der bisherigen Praxis der WTU verdeutlichten die Relevanz eines systematischen Entwicklungsansatzes. Die iterative App-Entwicklung, die Erprobung unter Realbedingungen, die Integration von Feedback aus dem Betrieb sowie die Analyse sensorbasierter Alternativen stellten dabei angemessene und zielgerichtete Maßnahmen dar, um tragfähige Lösungen zu identifizieren. Die Arbeitsschritte und eingesetzten Mittel waren in Umfang und Tiefe an die Anforderungen eines funktionalen Demonstrators angepasst und im Verhältnis zur Zielstellung des Projekts angemessen.

Die Höhe der im Rahmen des Fördervorhabens eingesetzten Aufwände durch das interne Personal waren angemessen und auch notwendig. Ohne diese Fördermaßnahme wären die erarbeiteten Ergebnisse und Erkenntnisse nicht erworben worden.

Der Verlauf der Arbeiten im Projekt folgt der im Projektantrag formulierten Planung. Alle im Arbeitsplan formulierten Aufgaben wurden erfolgreich bearbeitet. Durch die Förderung war eine gemeinsame Bearbeitung des Themas im Projektkonsortium erst möglich, da das Risiko der Projektdurchführung für die einzelnen Partner gesenkt wurde. Die Zusammenführung der Expertisen aus Forschung und Praxis führte zu einer Erhöhung des Know-Hows auf allen Seiten und war für die Aufgabenstellung der zwingend erforderlich, da jeder einzelne Partner allein nicht das notwendige Gesamtwissen gehabt hätte.

## **II.2 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans liegt der voraussichtliche Nutzen der DIANA-Ergebnisse für die SGKV vor allem in deren breiter fachlicher und praxisorientierter Nutzung. Die im Projekt erarbeiteten Prozessmodelle, Ziel- und Maßnahmenkataloge, Auswertungen der Feldversuche sowie die multimedialen Transferformate (3D-Animationsfilm, Beiträge in KV-Mediathek, Fachartikel, Vorträge) werden von der SGKV dauerhaft zur Beratung von Häfen, Terminals, EVU und Verladern, zur

Unterstützung von Investitions- und Förderentscheidungen sowie in Aus- und Weiterbildungsformaten (u. a. Hochschulkurse, Schulungen, Workshops) eingesetzt.

Damit können die Projektergebnisse standortübergreifend verwertet werden, indem sie als Best-Practice-Referenz für die digitale Unterstützung der WTU dienen, Standardisierungs- und Strategieprozesse (z. B. zu Datenstrukturen und Schnittstellen im KV) fachlich unterlegen und zugleich nachfolgende Forschungs- und Innovationsvorhaben zur Digitalisierung des Kombinierten Verkehrs vorbereiten und beschleunigen. Zudem kann das aufgebautes Knowhow auch für andere Forschungsprojekte, wie beispielsweise DIMI, verwendet werden.

## **4 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens während der Durchführung**

Im Projektverlauf wurden zentrale technische und inhaltliche Fortschritte erzielt. Auf Grundlage der durchgeführten Prozessanalysen und Anforderungsworkshops wurde eine mobile Anwendung zur digitalen Unterstützung der wagentechnischen Untersuchung (WTU) entwickelt. Die App entstand in einem iterativen Sprintprozess und wurde 2024 in zwei Feldversuchen am Standort Lübeck unter realen Bedingungen erprobt. Parallel wurde eine akustische Sensoriklösung zur Schadwagendetektion am Standort Duisburg installiert und getestet. Die Erprobung zeigte grundsätzliches Potenzial zur Erkennung von Anomalien, wenngleich die vorliegende Datenbasis für eine zuverlässige KI-Auswertung noch nicht ausreicht. Zur Einordnung aktueller Marktansätze wurde eine Übersicht relevanter Anbieter von automatisierten Detektionssystemen erstellt. Dabei wurden technologische Ansätze (akustisch, optisch, thermisch) und Einsatzgebiete analysiert und bewertet. Zusätzlich wurde die App testweise mit einer Datenbrille kombiniert, um Potenziale für AR-gestützte Anwendungen in der WTU auszuloten.

Die erzielten Ergebnisse bilden eine fundierte Grundlage für die Weiterentwicklung digitaler Prüfunterstützung im Bahn- und Terminalbetrieb.

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

### **Digitales**

Der im Vorhaben erstellte 3D-Animationsfilm zur digitalen Unterstützung der wagentechnischen Untersuchung ist über die Website der SGKV veröffentlicht worden und wird dort dauerhaft für Mitglieder, Praxisakteure und die interessierte Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Er dient der anschaulichen Vermittlung der Projektergebnisse und wird zudem in Präsentationen und Fachveranstaltungen der SGKV eingesetzt.

### **Lehre**

Die SGKV führt an der Berliner Hochschule für Technik (BHT) im wöchentlichen Turnus den AWE-Kurs „Klimaschutz mit Hilfe umweltfreundlicher Waren-Transportketten – Green Logistics“ durch. Der dem Studium Generale zugeordnete Hochschulkurs steht allen Studierenden fachbereichsunabhängig offen

und vermittelt einen umfangreichen Überblick über allgemeine Logistikgrundlagen, Nachhaltigkeitsthemen sowie Fragestellungen zum Kombinierten Verkehr. Im Rahmen des Kurses werden auch die Ergebnisse des Projekts DIANA vorgestellt und als aktuelles Praxisbeispiel zur Digitalisierung im Kombinierten Verkehr genutzt.

### **Vorträge**

Das Vorhaben wurde von leogistics im Rahmen eines Science Slams auf dem TerminalTag 2024 der SGKV vorgestellt. Der Vortrag präsentierte die Projektergebnisse einem Fachpublikum aus Hafen-, Terminal- und KV-Branche und trug so zur breiten Dissemination der Ergebnisse bei.

### **Publikationen**

Für DIANA wurde seitens des BMV ein Steckbrief als „Case study“ als Ergänzung zum „Handbook on Automation and Digitalization in Intermodal Freight Transport and Logistics“ angefragt und erstellt. Dieses wurde von der UN ECE Arbeitsgruppe über den intermodalen Güterverkehr beschlossen hat und von der UN ECE veröffentlicht werden.

Zu den Projektergebnissen wurden zudem Fachartikel im Bahn Manager Magazin sowie im Magazin Pegelstand veröffentlicht. Darüber hinaus ist ein weiterer Beitrag in der Fachzeitschrift EI – DER EISENBAHNINGENIEUR in Vorbereitung.



## Anlage 2 Steckbrief Dokumente und Daten

Ziel der Übersicht ist die Darstellung aller mit der WTU (ggf. inkl. Vorprüfung) verbundenen Informationen. Grundlage bilden (nicht einheitliche) Dokumente wie Wagenliste oder WTU-Protokoll. Zudem wird der erste digitale Ursprung der Infos im Rahmen des Transports aufgelistet.

Nr.	Dokument	Information	Fokus	einheitliches Format?	Ursprung der Info (initiale Digitalisierung)	Art der Übermittlung	Änderung der Info
WL1	Wagenliste	Datum Wagenliste	Zug		EVU Eingang		
WL2	Wagenliste	Uhrzeit Wagenliste	Zug		EVU Eingang		
WL3	Wagenliste	Zugnummer	Zug	ja	EVU Eingang		
WL4	Wagenliste	Name 1 Triebfahrzeugführer/in (Tf)	Zug		EVU Eingang		
WL5	Wagenliste	Name 2 Triebfahrzeugführer/in (Tf)	Zug		EVU Eingang		
WL6	Wagenliste	LüP	Triebfahrzeug		EVU Eingang		
WL7	Wagenliste	V-max (in Km/h)	Triebfahrzeug		EVU Eingang		
WL8	Wagenliste	Ladungsgewicht (to) insg.	Zug		EVU Eingang		
WL9	Wagenliste	Waggongewicht (to) insg.	Zug		EVU Eingang		
WL10	Wagenliste	Gesamtgewicht (to)	Zug		EVU Eingang		
WL11	Wagenliste	Bremsgewicht P (to)	Zug		EVU Eingang		
WL12	Wagenliste	Bremsgewicht G (to)	Zug		EVU Eingang		
WL13	Wagenliste	Handbremse Stck (Anzahl insg.)	Zug		EVU Eingang		
WL14	Wagenliste	Versandbahnhof	Zug		EVU Eingang	E-Mail	
WL15	Wagenliste	Bestimmungsbahnhof	Zug		EVU Eingang		
WL16	Wagenliste	Anzahl Gesamtwaggons	Waggon		EVU Eingang		
WL17	Wagenliste	Achsen beladen (insg.)	Achsen		EVU Eingang		
WL18	Wagenliste	Achsen leer (insg.)	Achsen		EVU Eingang		
WL19	Wagenliste	Waggons mit Gefahrgut	Waggon		EVU Eingang	E-Mail	
WL20	Wagenliste	Wagennummer 1+2	Waggon		EVU Eingang	E-Mail	
WL21	Wagenliste	Wagennummer 3+4	Waggon		EVU Eingang		
WL22	Wagenliste	Wagennummer 5-8	Waggon		EVU Eingang		
WL23	Wagenliste	Wagennummer 9-11	Waggon		EVU Eingang		
WL24	Wagenliste	Wagennummer 12	Waggon		EVU Eingang		
WL25	Wagenliste	Gattungsbuchstaben (nach Wagen)	Wagen		EVU Eingang		
WL26	Wagenliste	Achsen beladen (Anzahl nach Waggon)	Achsen		EVU Eingang		
WL27	Wagenliste	Achsen leer (Anzahl nach Waggon)	Achsen		EVU Eingang		
WL28	Wagenliste	Länge über Puffer (in mm nach Waggon)	Waggon		EVU Eingang		
WL29	Wagenliste	Eigengewicht (tara) (in kg nach Waggon)	Waggon		EVU Eingang		
WL30	Wagenliste	Gewicht der Ladung (in kg nach Waggon)	Waggon		EVU Eingang		
WL31	Wagenliste	Gesamtgewicht (in kg nach Waggon)	Waggon		EVU Eingang		
WL32	Wagenliste	Gefahrgut (ja / nein nach Waggon)	Waggon		EVU Eingang		
WL33	Wagenliste	Bremsgewicht P (in to nach Waggon)	Waggon		EVU Eingang		
WL34	Wagenliste	Bremsgewicht G (in to nach Waggon)	Waggon		EVU Eingang		
WL35	Wagenliste	Handbremse (nach Waggon)	Waggon		EVU Eingang		
WL36	Wagenliste	V-max (in km/h nach Waggon)	Waggon		EVU Eingang		
WL37	Wagenliste	Versandbahnhof (nach Waggon)	Waggon		EVU Eingang		
WL38	Wagenliste	Bestimmungsbahnhof (nach Waggon)	Waggon		EVU Eingang		
WL39	Wagenliste	Bemerkungen oder UN Nummer (bei GG siehe zusätzlich auch Anlage) (nach Waggon)	Waggon		EVU Eingang		
WL40	Wagenliste	maximales Bremsgewicht (nach Waggon)	Waggon		EVU Eingang		
WL41	Wagenliste	Bremsgewicht G insg. ohne Abzüge	Zug		EVU Eingang		
WL42	Wagenliste	Bremsgewicht G insg. mit Abzügen	Zug		EVU Eingang		
WL43	Wagenliste	Bremsgewicht P insg. ohne Abzüge	Zug		EVU Eingang		
WL44	Wagenliste	Bremsgewicht P insg. mit Abzügen	Zug		EVU Eingang		
WL45	Wagenliste	Gesamtbremsgewicht	Zug		EVU Eingang		
WL46	Wagenliste Ausgang	Name Wagenmeister	Zug		Wagenmeister		
GG1	Anlage Gefahrgut (gehört zur Wagenliste)	Zugnummer	Zug		EVU Eingang		
GG2	Anlage Gefahrgut (gehört zur Wagenliste)	Versanddatum	Zug		EVU Eingang		
GG3	Anlage Gefahrgut (gehört zur Wagenliste)	Versandbahnhof (Code!) (nach Zug)	Zug		EVU Eingang		
GG4	Anlage Gefahrgut (gehört zur Wagenliste)	Empfangsbahnhof (Code!) (nach Zug)	Zug		EVU Eingang		
GG5	Anlage Gefahrgut (gehört zur Wagenliste)	Zugposition (ab Spitze)	Waggon		EVU Eingang		
GG6	Anlage Gefahrgut (gehört zur Wagenliste)	Wagennummer	Waggon		EVU Eingang		
GG7	Anlage Gefahrgut (gehört zur Wagenliste)	Code der Ladeeinheit (BIC-Code, ggf. ILLU-Code?)	Ladeeinheit		EVU Eingang		
GG8	Anlage Gefahrgut (gehört zur Wagenliste)	Kennz d. Gefahr (Nr.)	Ladeeinheit		EVU Eingang		
GG9	Anlage Gefahrgut (gehört zur Wagenliste)	UN-Nummer (Nr.)	Ladeeinheit		EVU Eingang		
GG10	Anlage Gefahrgut (gehört zur Wagenliste)	Versandbahnhof (Code!) (nach LE)	Ladeeinheit		EVU Eingang		
GG11	Anlage Gefahrgut (gehört zur Wagenliste)	Empfangsbahnhof (Code!) (nach LE)	Ladeeinheit		EVU Eingang		
GG12	Anlage Gefahrgut (gehört zur Wagenliste)	offizielle Benennung d. gef. Gutes (+techn. Benennung) (nach LE)	Ladeeinheit		EVU Eingang		
GG13	Anlage Gefahrgut (gehört zur Wagenliste)	Gefahrzettel (Nr.) (nach LE)	Ladeeinheit		EVU Eingang		
GG14	Anlage Gefahrgut (gehört zur Wagenliste)	Verpackungsgruppe (Nr.)	Ladeeinheit		EVU Eingang		
GG15	Anlage Gefahrgut (gehört zur Wagenliste)	Nettomasse in kg (nach LE)	Ladeeinheit		EVU Eingang		
GG16	Anlage Gefahrgut (gehört zur Wagenliste)	Bruttomasse in kg (nach LE)	Ladeeinheit		EVU Eingang		
GG17	Anlage Gefahrgut (gehört zur Wagenliste)	Anzahl u. Art d. Versandstücke (nach LE)	Ladeeinheit		EVU Eingang		
GG18	Anlage Gefahrgut (gehört zur Wagenliste)	Beförderung nach RID Unterabschnitt 1.1.4.2.1 (nach LE)	Ladeeinheit		EVU Eingang		
WU1	WTU Protokoll	Firmenname (Wagenmeister)	Zug		Wagenmeister		
WU2	WTU Protokoll	Straße + Hausnr. (Wagenmeister)	Zug		Wagenmeister		

WU3	WTU Protokoll	PLZ + Ort (Wagenmeister)	Zug	Wagenmeister
WU4	WTU Protokoll	Telefon (Wagenmeister)	Zug	Wagenmeister
WU5	WTU Protokoll	Fax (Wagenmeister)	Zug	Wagenmeister
WU6	WTU Protokoll	Zugnummer	Zug	EVU Eingang
WU7	WTU Protokoll	Datum WTU Protokoll	Zug	Wagenmeister
WU8	WTU Protokoll	Name Wagenmeister	Zug	Wagenmeister
WU9	WTU Protokoll	Einsatzort	Zug	Wagenmeister
WU10	WTU Protokoll	Bestimmungsbahnhof	Zug	EVU Eingang
WU11	WTU Protokoll	Auftragerteilung (schriftlich / telefonisch)	Zug	Wagenmeister
WU12	WTU Protokoll	Einsatzzeit von (Uhrzeit)	Zug	Wagenmeister
WU13	WTU Protokoll	Einsatzzeit bis (Uhrzeit)	Zug	Wagenmeister
WU14	WTU Protokoll	bestellte Abfahrtszeit (Uhrzeit)	Zug	?
WU15	WTU Protokoll	Gleis	Zug	Wagenmeister
WU16	WTU Protokoll	EVU (Name / Kürzel) Eingang / Ausgang?	Zug	
WU17	WTU Protokoll	Wagenliste erstellt (Ja / Nein)	Zug	Wagenmeister
WU18	WTU Protokoll	Gefahrgutkontrolle durchgeführt? (Ja / Nein)	Zug	Wagenmeister
		Bremsprobe druchgeführt (Ja / Nein / Pdr-Gerät / Zuglok / Rangierlok)	Zug	Wagenmeister
WU19	WTU Protokoll			
WU20	WTU Protokoll	Erster Wagen (Wagennummer)	Zug	
WU21	WTU Protokoll	Letzer Wagen (Wagennummer)	Zug	
WU22	WTU Protokoll	Anzahl Wagen (insg.)	Zug	
WU23	WTU Protokoll	Anzahl der Achsen (insg.)	Zug	
WU24	WTU Protokoll	Zugschluss (ZGZ) steckt (Ja /Nein)	Zug	
WU25	WTU Protokoll	Zuglok (Nr.)	Zug	
WU26	WTU Protokoll	Besonderheiten (Textfeld)	Zug	Wagenmeister
		Wagennummer(n) (Schadwagen)		Wagenmeister /
WU27	WTU Protokoll	(Zugposition + Wagennummer)	Waggon	Schadwagenprotokoll
				Wagenmeister /
WU28	WTU Protokoll	Schadcode(s) (Schadwagen)	Waggon	Schadwagenprotokoll
WU29	WTU Protokoll	Halter (Schadwagen)	Waggon	
				Wagenmeister /
WU30	WTU Protokoll	Beschreibung des Schadens / Wortlaut auf Schadzettel	Waggon	Schadwagenprotokoll
WU31	WTU Protokoll	Bremse aus	Waggon	Wagenmeister
WU32	WTU Protokoll	Muster	Waggon	Wagenmeister
WU33	WTU Protokoll	Wagennummer (für Zugsicherung)	Waggon	Wagenmeister
		Art der Zugsicherung (Feststellbremse / Hemmschuh / Radvorleger)	Waggon	Wagenmeister
WU34	WTU Protokoll			
WU35	WTU Protokoll	Nicht anzurechnende Bremsgewichte	Waggon	Wagenmeister
		Wurden dem Wagenhalter die Schadmeldungen übermittelt? (Ja / Nein)	Waggon	Wagenmeister
WU36	WTU Protokoll			
WU37	WTU Protokoll	Datum (für Unterschrift)	Zug	Wagenmeister
WU38	WTU Protokoll	Name Wagenmeister	Zug	Wagenmeister
SP1	Schadwagenprotokoll	Zugnummer	Zug	?
SP2	Schadwagenprotokoll	Datum Schadwagenprotokoll	Zug	
SP3	Schadwagenprotokoll	Versandbahnhof (Code!)	Zug	
SP4	Schadwagenprotokoll	Bestimmungsbahnhof (Code!)	Zug	
SP5	Schadwagenprotokoll	Bremsstellung (P / G)	Zug	
SP6	Schadwagenprotokoll	Datum der WTU	Zug	
SP7	Schadwagenprotokoll	Referenz		Wagenmeister
SP8	Schadwagenprotokoll	Name Wagenmeister		Wagenmeister
SP9	Schadwagenprotokoll	Zugposition & Wagennummer (1. Wagen)	Zug	
SP10	Schadwagenprotokoll	Zugposition & Wagennummer (letzter? Wagen)	Zug	
SP11	Schadwagenprotokoll	Zeil. Nr.	Waggon	Wagenmeister
SP12	Schadwagenprotokoll	Rei. Nr.	Waggon	Wagenmeister
SP13	Schadwagenprotokoll	Wagennummer	Waggon	
SP14	Schadwagenprotokoll	VKM (Wagenhalter)	Waggon	
SP15	Schadwagenprotokoll	Beladungszustand	Waggon	
SP16	Schadwagenprotokoll	Bestimmungsbahnhof (Code!) (nach Waggon)	Waggon	
SP17	Schadwagenprotokoll	Schadcode lt. AVV Aballee 9, Anhang 1	Waggon	Wagenmeister
SP18	Schadwagenprotokoll	Beschreibung des Schadens	Waggon	Wagenmeister
SP19	Schadwagenprotokoll	Muster	Waggon	Wagenmeister / WTU-Protokoll
SP20	Schadwagenprotokoll	Bemerkung	Waggon	Wagenmeister
SP21	Schadwagenprotokoll	Bremse aus	Waggon	Wagenmeister / WTU-Protokoll
SG1	Güterwagen AVV Anlage 4	<b>1. Allgemeine Informationen</b>		
		Schadensprotokoll für		
SG2	Güterwagen AVV Anlage 4	Name des verwendenden EVU	Zug	
		Schadensprotokoll für		
SG3	Güterwagen AVV Anlage 4	Schadensprotokoll Nr.	Zug	
		Schadensprotokoll für		
SG4	Güterwagen AVV Anlage 4	Sendungsnummer	Zug	
		Schadensprotokoll für		
SG5	Güterwagen AVV Anlage 4	Zugnummer	Zug	
		Schadensprotokoll für		
SG6	Güterwagen AVV Anlage 4	Ort der Schadensfeststellung	Wagen	
		Schadensprotokoll für		
SG7	Güterwagen AVV Anlage 4	Datum Schadensfeststellung	Wagen	
		Schadensprotokoll für		
SG8	Güterwagen AVV Anlage 4	Versandbahnhof	Wagen	
		Schadensprotokoll für		
SG9	Güterwagen AVV Anlage 4	Bestimmungsbahnhof	Wagen	
		Schadensprotokoll für		
SG10	Güterwagen AVV Anlage 4	Versanddatum	Wagen	
		Schadensprotokoll für		
SG11	Güterwagen AVV Anlage 4	Ladungszustand	Wagen	
		Schadensprotokoll für		
SG12	Güterwagen AVV Anlage 4	Wagennummer	Wagen	
		Schadensprotokoll für		
SG13	Güterwagen AVV Anlage 4	VKM (Wagenhalter)	Wagen	

SG14	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	E-Mail-Adresse (Wagenhalter)	Wagen
SG15	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	<b>2. Beschreibung des Schadens</b>	Wagen
SG16	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	Schadcode lt. AVV Anlage 9	Wagen
SG17	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	Mangelbezeichnung (Beschreibung + Neuschade / Altschaden)	Wagen
SG18	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	Zusätzliche Bewerkungen	Wagen
SG19	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	<b>3. Vorgefundene Bezeichnung</b>	
SG20	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	Muster	Wagen
SG21	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	Datum der vorgefundene Bezeichnung	Wagen
SG22	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	Name des EVU's der vorgefundene Bezeichnung	Wagen
SG23	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	<b>4. Erfolgte Bezeichnung</b>	Wagen
SG24	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	Muster	Wagen
SG25	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	Aussetzen	Wagen
SG26	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	Zuführung in die Werkstatt	Wagen
SG27	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	<b>5. Schadensfeststellung erfolgte bei der Übernahme von</b>	Wagen
SG28	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	Anschlussbahn (AVV-EVU / nicht AVV-EVU)	Wagen
SG29	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	Name Anschlussbahn	Wagen
SG30	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	<b>6. Angaben zum Verursacher</b>	Wagen
SG31	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	Dropdown (Versleiß / Gewaltschaden im Eisenbahnbetrieb / Dritter / Verursacher nicht ermittelbar)	Wagen
SG32	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	Name und Anschrift des Dritten	Wagen
SG33	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	Unterschrift des Dritten	
SG34	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	Ort	
SG35	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	Datum	
SG36	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	Kontakt bei Rückfragen	
SG37	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	Telefon (Wagenmeister)	
SG38	Schadensprotokoll für Güterwagen AVV Anlage 4	Anlagen Vorhanden (Ja / Nein)	
	Infos für Bezeichnung fehlt		
	Ladefeld Ausgang		Ladeinheit
	Ladefeld Eingang relevant?		
	Schadwagen & AVV Anlage 4?	Falls für den gleichen Zweck, dann auf redundante Daten prüfen	
	Brandszettel irrelevant, da nicht Aufgabe des Wagenmeisters		
	Wer erstellt die Wagenliste für den Ausgang		
	Wer erstellt die Ladefeld für den Ausgang?		