Partnerindividueller Abschlussbericht des Verbundprojektes

TOLKIEN – Digitaler Zwilling zur Optimierung von Logistik in Binnenhäfen

angefertigt durch das

Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML

Fraunhofer IML

Förderkennzeichen: 19H22005A

27.08.2026

Projektlaufzeit: 07/2022 – 02/2026

Projektträgerschaft Innovative Hafentechnologien

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

A Autorinnen und Autoren

Andreas Gade

Daniel Scheible

Uwe Nögel

Achim Klukas

Hinweis: Zur Unterstützung bei sprachlicher Überarbeitung, Strukturierung und Programmierung wurden teilweise KI-basierte Sprachmodelle (LLM) eingesetzt. Alle Inhalte wurden fachlich geprüft und die Verantwortung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

B Inhaltsverzeichnis

1 Projektzusammenfassung 7

1.1 Aufgabenstellung 7

1.2 Durchführung 8

2 Projektvoraussetzungen 9

3 Ausführliche Darstellung der Arbeiten des Fraunhofer IML 12

3.1 AP 1 – Bestandsaufnahme und Anforderungsdefinition 12

3.1.1 AP 1.1 Prozessaufnahme 12

3.1.2 AP 1.2 Identifikation von bestehenden Datenquellen 13

3.1.3 AP 1.3 Anforderungsdefinition an einen Port-Tower 14

3.2 AP 2 – Technische Konzeption 16

3.2.1 AP 2.1 Spezifikation der technischen Umsetzung 16

3.2.2 AP 2.2 Evaluation technischer Systemkomponenten 17

3.2.3 AP 2.3 Aufbau einer Datenbasis 17

3.3 AP 4 – Digitale Modellierung und Softwareentwicklung 19

3.3.1 AP 4.1 Entwicklung einer Systemarchitektur 19

3.3.2 AP 4.2 Aufbau einer Entwicklungsumgebung und Entwicklungsprozess 21

3.3.3 AP 4.3 Softwareentwicklung 22

3.4 AP 3 – Prognose und Handlungsempfehlungen 24

3.4.1 AP 3.1 Modellentwicklung 24

3.4.2 AP 3.2 Ableitung von Handlungsmaßnahmen und Hinweisen 25

3.5 AP 5 – Evaluation und Ergebnistransfer 26

3.5.1 AP 5.1 Logistische (Business-)Szenarienevaluation 26

3.5.2 AP 5.2 Technische Evaluation und Validierung 26

3.5.3 AP 5.3 Ergebnistransfer 27

3.6 AP 6 – Projektorganisation 29

4 Fazit und weiterer Forschungsbedarf 30

5 Quellenverzeichnis 33

C Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über Business Szenarien im Projekt TOLKIEN _____ *7*
Abbildung 2: Beispielhafte schematische Datenpipeline eines digitalen Zwillings (nach Göckel und Müller) ___ *10*
Abbildung 3: Logistikprozess Hafenbahn in Trier, eigene Darstellung _____ *13*
Abbildung 4: Foto der Teilergebnisse aus dem Priorisierungsworkshops vom 07.03.2023 _____ *15*
Abbildung 5: TOLKIEN Architektur mit allen Bestandteilen des digitalen Zwillings _____ *20*
Abbildung 6: Arbeits- und Zeitplan _____ *29*

D Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Präsenztreffen zur Prozessaufnahme, Organisation durch das Fraunhofer IML _____ *12*

E Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ABVT	Amt für Binnen-Verkehrstechnik
AIS	Automatic Identification System
AP	Arbeitspaket
API	Application Programming Interface
BIM	Building Information Modeling
BMV	Bundesministerium für Verkehr
CI/CD	Continuous Integration / Continuous Delivery
DBMS	Datenbankmanagementsystem
DigiTest	Förderprogramm Digitale Testfelder in Häfen
DWD	Deutscher Wetterdienst
ERP	Enterprise Resource Planning
ETL	Extract, Transform, Load
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
GDWS	Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt
GPS	Global Positioning System
IDE	Integrated Development Environment
IHATEC	Förderprogramm Innovative Hafentechnologien
IML	Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik
IoT	Internet der Dinge (Internet of Things)
JWT	JSON-Web-Token
KI	Künstliche Intelligenz
KPI	Key Performance Indicator
LANUK	Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen (LANUK)
LeiDis	Leitsystem Disposition (der DB InfraGO)
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
OCR	Optical Character Recognition
SV	Schwerverkehrsanteil
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit
THG	Trierer Hafengesellschaft
TOS	Terminal Operating System
UBA	Umweltbundesamt
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

1 Projektzusammenfassung

Dieses Dokument stellt den partnerspezifischen Abschlussbericht des Fraunhofer IML (Förderkennzeichen: 19H22005A) im Verbundprojekt „TOLKIEN - Digitaler Zwilling zur Optimierung von Logistik in Binnenhäfen“ dar. Nach einer Projektzusammenfassung werden die Aufgaben, welche durch das IML bearbeitet worden sind, beschrieben. Details zu den Aufgaben der anderen Verbundpartner und den genauen Zusammenhängen zwischen den bearbeiteten Teilaufgaben in den jeweiligen Arbeitspaketen, welche in diesem Bericht nicht aufgeführt sind, sind im gemeinsamen Abschlussbericht des Projektes zu finden.

1.1 Aufgabenstellung

Die Ziele des Projektes TOLKIEN waren die Identifikation und Zusammenführung von einzelnen Datenquellen innerhalb eines Hafens, der damit verbundene Aufbau einer strukturierten und einheitlichen Datenbasis, sowie die konsistente Darstellung von Prozessen zur Förderung der Visibilität von Emissionen und Verkehrsflüssen. Es sollte eine digitale Abbildung der Geschäftsprozesse auf dem Hafengelände in Form eines digitalen Zwillings entwickelt werden. Auf Basis des digitalen Zwillings und der enthaltenen Datenbasis sollten relevante KPIs identifiziert und in einem digitalen Dashboard abgebildet werden, wodurch die Transparenz und die Übersichtlichkeit der Prozesse auf dem Hafengelände erhöht werden können. Des Weiteren sollten für ausgewählte Anwendungen rechnergestützte Handlungsempfehlungen auf Basis künstlicher Intelligenz getestet werden, um daraus Handlungsalternativen ableiten zu können.

Zur Eingrenzung des Betrachtungsraumes wurden drei Business Szenarien entwickelt, welche im Projektverlauf um ein viertes Szenario erweitert worden sind. Die ursprünglich definierten Szenarien sind die digitale Verkehrserfassung der Hafenbahn im Hafen Trier, die digitale Erfassung eines Logistikareals sowie das Monitoring von Emissionen im Hafen Duisburg und die digitale wasserseitige Verkehrserfassung in beiden Häfen. Erweitert wurden diese um das Szenario der digitalen straßenseitigen Verkehrserfassung im Hafen Trier. Ein Überblick über die Szenarien ist in Abbildung 1 zu finden, genauere Details werden im Kapitel 3 dargestellt.

Abbildung 1: Übersicht über Business Szenarien im Projekt TOLKIEN

1.2 Durchführung

Das Projekt wurde im Zeitraum von Juli 2022 bis Februar 2026 durchgeführt und gliederte sich in fünf inhaltliche Arbeitspakete sowie ein Arbeitspaket für das Projektmanagement. Die Gesamtprojektleitung lag beim Fraunhofer IML, die Leitung einzelner Arbeitspakete wurde von den jeweiligen Konsortialpartnern übernommen. Die Projektbearbeitung erfolgte in enger Abstimmung zwischen den Partnern. In diesem Bericht werden nur die Arbeiten des Fraunhofer IML in den Arbeitspaketen dargestellt. Es werden keine ausführlichen Ergebnisse geschildert, diese sind dem gemeinsamen Abschlussbericht des Konsortiums zu entnehmen.

2 Projektvoraussetzungen

Zum Zeitpunkt des Projektbeginns im Jahr 2022 existierte keine einheitliche Definition eines digitalen Zwillings. Aus den analysierten Literaturquellen ließ sich ableiten, dass das grundlegende Verständnis des Konzeptes in jeder Quelle jedoch ähnlich ist. Die konkrete Ausprägung hängt von den individuellen Use Cases ab[1].

Ein digitaler Zwilling besteht aus mehreren, meist drei bis vier, Komponenten[2]. Im Zentrum steht das physische Objekt, welches digital abgebildet werden soll. Dies kann ein einzelnes Bauteil, eine Maschine, oder auch eine Stadt bzw. ein Hafen sein. Im Projekt TOLKIEN wurden gemäß der definierten Aufgabenstellung einzelne Teile der Häfen Trier und Duisburg betrachtet, aufgeteilt nach den beschriebenen Business Szenarien.

Neben dem Objekt steht die digitale Repräsentanz, welches eine Abbildung des physischen Objektes ist. Es handelt sich bei dieser Repräsentanz um Daten, welche über das Objekt gesammelt und in einer Datenbasis (auch Data Lake) gespeichert werden. Diese Datenbasis kann, je nach Verständnis des digitalen Zwillings, um beliebige Funktionen erweitert werden. Es können Analysen durchgeführt werden, ein Dashboard mit Live-Daten zur Verfügung gestellt werden oder eine dreidimensionale Abbildung des Objektes in Echtzeit angefertigt und aktualisiert werden. Das Projekt TOLKIEN setzte den Fokus auf die Datensammlung und -auswertung sowie die darauf ermöglichte Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Rückführung in den realen Betrieb.

Die dritte Komponente des digitalen Zwillings stellt die Datenübertragung zwischen physischer und virtueller Seite dar. Diese kann in beide Richtungen jeweils unidirektional oder bidirektional erfolgen[3]. Bei einer bidirektionalen Übertragung können Erkenntnisse der Analysen direkt in das reale System zurückgespielt werden, um den operativen Betrieb zu beeinflussen. Diese Richtung wurde im Projekt nicht verfolgt, da das Projekt durch die Bildung des Konsortiums auf die Perspektive der Hafenbetreiber ausgerichtet wurde. Der Fokus der aufgestellten Business-Szenarien lag daher auf der Datensammlung und -auswertung für die langfristige taktische und strategische Planung der Hafenbetreiber.

Als vierte Komponente wurde die Lebenszyklusbetrachtung beschrieben. Hierfür wird die Dimension der Zeit mit in die Beobachtung aufgenommen, um ein Bauteil oder eine Maschine nicht nur live, sondern über ihren gesamten Nutzungszeitraum hinweg beobachten zu können. Dieses Konzept entspricht im Wesentlichen der Idee von Building Information Modeling (BIM). Mithilfe von BIM wird ein Objekt (bzw. Bauwerk) entweder direkt beim Bau oder nachträglich digital abgebildet. Über den Nutzungszeitraum hinweg können regelmäßig Daten über das Objekt aufgezeichnet werden, um den Zustand zu ermitteln, zu monitoren und für zukünftige Arbeiten verfügbar zu haben. BIM wird durch die Bundesregierung, u.a. durch das fördermittelgebende BMV, im „Zentrum für die Digitalisierung des Bauwesens“ als Zukunftstechnologie gefördert und standardisiert[4]. Es kann im Projektkontext als vierte Komponente eines digitalen Zwillings aufgezählt werden. Bei der Betrachtung eines Hafens können alle Bauwerke, die für den Betrieb und die angestrebte Verkehrsverlagerung notwendig sind, abgebildet werden. Beispiele hierfür

[1] Metcalfe B, Boshuizen HC, Bulens J and Koehorst JJ. (2023): Digital twin maturity levels: a theoretical framework for defining capabilities and goals in the life and environmental sciences (F1000Research).
[2] Fuller, Aidan; Fan, Zhong; Day, Charles; Barlow, Chris (2020): Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research.
[3] Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J. & Sihn, W. (2018): „Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification“. In: IFAC-PapersOnLine 51.11. PII: S2405896318316021, S. 1016–1022
[4] Zentrum für die Digitalisierung des Bauwesens, BIM Deutschland: https://www.bimdeutschland.de, zuletzt aufgerufen am 19.08.2026.

sind die Kaimauer oder die Gleisanlagen, welche in regelmäßigen Abständen überprüft werden und der Zustand sowie der Lebenszyklus somit dokumentiert und abgebildet sind.

Die Technologien zur Implementierung eines digitalen Zwillings setzen sich aus etablierten Standards zusammen, welche teils neu kombiniert werden[5]. Maßgeblich zu nennen ist hierbei das Internet der Dinge (IoT), in welchem physische Gegenstände mit Sensorik ausgestattet werden und miteinander sowie mit dem Internet verbunden werden. In diesem Kontext wird ein IoT-Stack implementiert, welcher, abgeleitet aus dem klassischen Modell der Internetdatenübertragung, eine Kombination verschiedener Technologien auf mehreren Schichten der Datenübertragung beschreibt. Im Drei-Schichten-Modell des IoT existiert die Anwendungsschicht, die Netzwerkschicht, sowie die physikalische Schicht. Diese Schichten sind wichtig zu betrachten, da nur mit einem Verständnis aller Bestandteile ein digitaler Zwilling aufgebaut werden kann. Die physikalische Schicht setzt direkt am physischen Objekt an. Die aufgenommenen Daten müssen verschickt werden, was beispielsweise über WLAN, Ethernet, LoRa oder Bluetooth realisiert werden kann. Entsprechende Vor- und Nachteile müssen vor der Installation von Geräten abgewogen werden. Im Rahmen des Projektes haben Untersuchungen stattgefunden, welche in Kapitel 3.3.2 näher ausgeführt werden. Die Netzwerkschicht beschreibt das Routing der Daten durch das Netzwerk (z.B. IPv4/IPv6, TCP/UDP). Diese Schicht wird meist durch die Anwendungsschicht vorgegeben und musste für das Projekt nicht betrachtet werden. Die Anwendungsschicht bezeichnet das verwendete Softwareprotokoll (z.B. Message Queue Telemetry Transport MQTT oder Advanced Message Queuing Protocol AMQP). Dieses bietet u.a. die Möglichkeit, Nachrichten in Warteschlangen zu schicken, bis sie abgerufen werden. Die Formatierung der Daten, welche z.B. in den Formaten csv, xml oder json durchgeführt werden kann, ist kein Bestandteil des betrachteten Schichtenmodells und wurde im Rahmen der Schnittstellenentwicklung analysiert (siehe Kapitel 3.3.3 und folgende). Eine beispielhafte schematische Datenpipeline eines digitalen Zwillings vom IoT-Gerät bis zum Data Lake zur Speicherung von Daten ist in Abbildung 2 zu sehen.

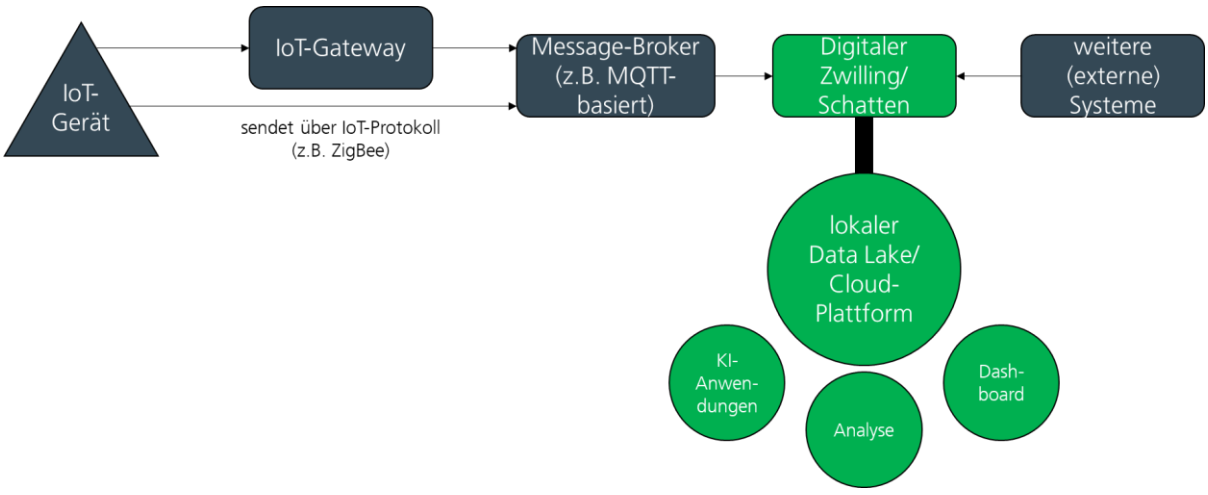

Abbildung 2: Beispielhafte schematische Datenpipeline eines digitalen Zwillings (nach Göckel und Müller[6])

Zur Standardisierung eines digitalen Zwillings im Hafenbereich wurden neue Standards wie TIC 4.0 entwickelt, um die IoT-Technologien im Hafenumfeld gezielt zu implementieren und auf ein

[5] Stiller, Burkhard; Schiller, Eryk; Schmitt, Corinna (2020): An Overview of Network Communication Technologies for IoT.
[6] Göckel, Nicole; Müller, Patrick (2020): Entwicklung und Betrieb Digitaler Zwillinge. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (Hg.): Digitaler Zwilling. Ein virtuelles Abbild entlang des gesamten Produktlebenszyklus. München.

einheitliches Verständnis hinzuwirken. Für die Durchführung des Projektes wurde der Standard analysiert, jedoch nicht verwendet, da er auf die Ebene der Echtzeitabbildung und Assetüberwachung ausgerichtet ist, und nicht auf die Sammlung von externen Daten, die über Drittanbieterschnittstellen mit bereits zuvor vorhandenen Standards verfügbar sind.

TOLKIEN setzte auf dem beschriebenen Stand der Technik auf. Zunächst wurde die bereits vorhandene technische Ausstattung der Projektpartner analysiert (Sensoren, Übertragungsnetze, Datenbanken, etc.), bevor geplant wurde, welche Sensoren neu installiert werden sollen. Nach Beginn des Projektes hat sich in der Planungsphase ergeben, dass die Installation der IoT-Komponenten in ein externes Infrastrukturförderprogramm ausgelagert wird (Digitale Testfelder in Häfen – DigiTest – des BMV). Somit wurden diese Arbeiten nicht allein durch das Konsortium, sondern durch die Häfen und hardwareinstallierenden Unternehmen arrangiert. Das Fraunhofer IML war an diesen Arbeiten nur in beratender Rolle tätig. Details zu den DigiTest-Projekten SETRI in Duisburg und DiVer-HT in Trier werden im Gesamtbericht ausgeführt.

3 Ausführliche Darstellung der Arbeiten des Fraunhofer IML

3.1 AP 1 – Bestandsaufnahme und Anforderungsdefinition

Die Leitung und Koordination des AP 1 lag beim Projektpartner duisport. Das Fraunhofer IML hat im Arbeitspaket die Koordination der Prozessaufnahmen übernommen und diese gemeinsam mit den Partnern vor Ort in mehreren Workshops durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in Form von Prozessketten dokumentiert und dem Konsortium zur Verifizierung zur Verfügung gestellt (AP 1.1). Aus den Prozessketten hat das IML eine Übersicht über bestehende Datenquellen erarbeitet und deren Verfügbarkeit bewertet (AP 1.2). Um die Anforderungen an den digitalen Zwilling zu definieren, hat das IML im Rahmen eines Konsortialtreffens einen Workshop durchgeführt und die aufgestellten Anforderungen durch das Konsortium priorisieren lassen (AP 1.3).

3.1.1 AP 1.1 Prozessaufnahme

Für die Prozessaufnahmen wurden Workshops zwischen dem Fraunhofer IML und den beiden teilnehmenden Binnenhäfen jeweils vor Ort durchgeführt. Die Workshops bestanden aus einem Mix aus Interviews, Begehungen des Hafens sowie gemeinsamer Prozessaufnahmen und Dokumentationen. Die Erkenntnisse wurden im Anschluss an die Workshops in Prozessdiagrammen aufbereitet. Durch den Austausch vor Ort mit den Häfen wurde ein Verständnis für die Infrastruktur im Hafen geschaffen, was erste Indikationen für die benötigten Datentypen lieferte und eine erste Einschätzung zum erwarteten Umfang der benötigten Daten ermöglichte.

Die Prozessaufnahme für die Trierer Hafengesellschaft erfolgte vor Ort in Trier am 13.09.2022 und umfasste auch eine Begehung des Hafens und insbesondere der projektrelevanten Hafenbereiche. Die Prozessaufnahmen für den Hafen Duisburg erfolgten in zwei Workshops (19.10.2022 und 10.01.2023) in Duisburg. Darüber hinaus wurde das Kick-off Treffen im Duisburger Hafen am 29.08.2022 für eine Hafenbegehung genutzt.

Basierend auf der Prozessaufnahme und der Spezifizierung der Business Szenarien wurde der beschriebene Workshop zur Aufnahme und Priorisierung von Anforderungen und den erforderlichen Daten am 07.03.2023 in Hamburg durchgeführt. Dieser wurde anhand der MoSCoW-Methode durchgeführt. Details hierzu werden in Kapitel 3.1.3 (AP 1.3) ausgeführt.

Tabelle 1: Präsenztreffen zur Prozessaufnahme, Organisation durch das Fraunhofer IML

Ort	Datum	Inhalt
Duisburg	29.08.2022	Kick-Off und Prozessaufnahme
Trier	13.09.2022	Prozessaufnahme
Duisburg	19.10.2022	Prozessaufnahme
Duisburg	10.01.2023	Workshop Spezifizierung Business Szenarien (startport)
Hamburg	07.03.2023	Workshop der Business Szenarien und erforderlichen Daten (Digital Hub Logistics Hamburg)

Der Fokus lag sowohl auf der Darstellung der physischen als auch der informationslogistischen Prozesse. Im Schwerpunkt wird die Prozesssicht des Hafenbetreibers eingenommen. Die

Darstellung der Prozessketten erfolgt in Anlehnung an das Dortmunder Prozesskettenparadigma[7]. Dieses wird in einer zweidimensionalen Darstellungsform angewandt („Swimlane-Diagramm"). In den oberen drei Zeilen sind die jeweils an der Prozesskette beteiligten Unternehmen dargestellt. Diese sind farblich markiert, um die Unterscheidung zu erleichtern. Jedem Unternehmen sind in den Bahnen die jeweils eigenen Prozesse der Kette zugeordnet. In den unteren beiden Zeilen sind zusätzliche und ergänzende Informationen zu finden. In der Zeile „Informationslogistik" werden die ausgetauschten Informationen und Daten beschrieben und in der Bahn „zusätzliche Informationen" die dafür verwendeten Medien sowie detailliertere Beschreibungen der Prozesse. Diese Beschreibungen sind farblich markiert und somit einem Unternehmen der oberen Bahnen zugeordnet.

Nachfolgend ist ein Prozessdiagramm der Gesamtsicht des Logistikprozesses der Hafenbahn exemplarisch dargestellt (vgl. Abbildung 3). Die weiteren Prozessdiagramme sind dem Gesamtbericht zu entnehmen.

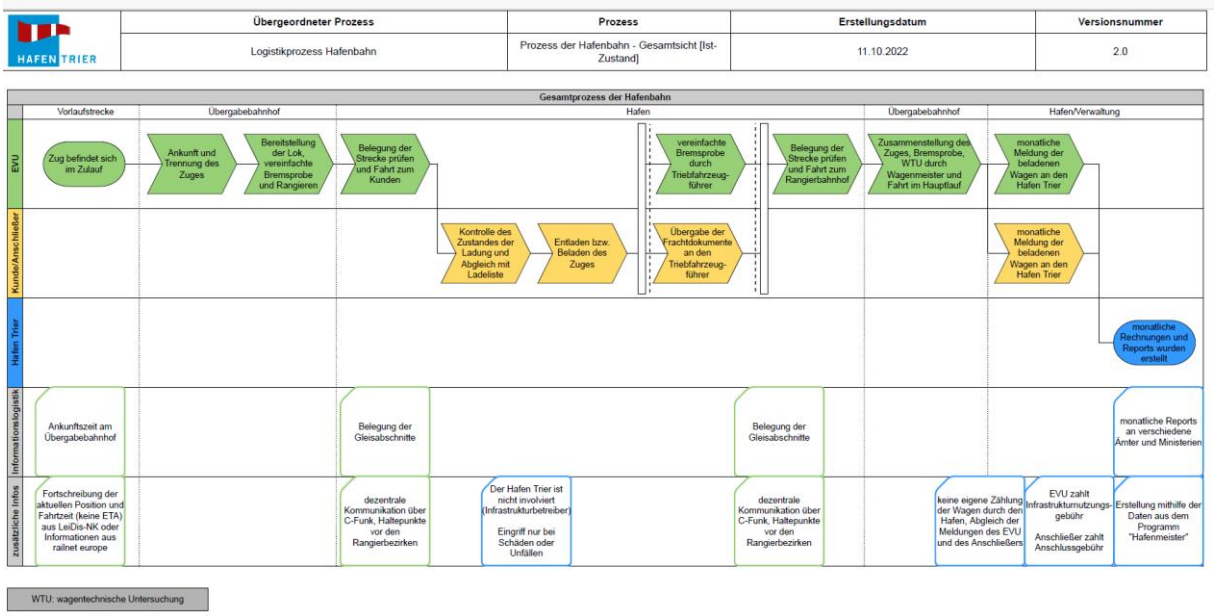

Abbildung 3: Logistikprozess Hafenbahn in Trier, eigene Darstellung

3.1.2 AP 1.2 Identifikation von bestehenden Datenquellen

Die Identifikation von bestehenden Datenquellen wurde zeitgleich mit der Prozessaufnahme (AP 1.1) durchgeführt, da sich aus den Status-Quo-Prozessen zu Projektbeginn die verwendeten Softwareprodukte und daraus verfügbaren Daten ergeben haben. Es wurden mehrere Ebenen an Datenquellen analysiert und identifiziert. Die erste Gruppe stellten die hafeninternen, direkt verfügbaren Daten dar. Die zweite Gruppe bestand aus internen und externen Datenquellen, die vorhanden, jedoch nicht direkt für das Projekt verfügbar waren. Es wurde geprüft, inwiefern diese erschlossen werden können. Die dritte Gruppe bestand aus öffentlich verfügbaren Datenquellen, welche jederzeit abgerufen und genutzt werden können (im Folgenden auch Sekundärdaten genannt). Diese Daten dienten im Projekt später der Unterstützung und Validierung von Erkenntnissen und internen Daten. Zu Beginn wurden zunächst jedoch manuell erhobene Daten

[7] Käppner, Martin; Laakmann, Frank; Stracke, Niklas (2002): Dortmunder Prozesskettenparadigma - Grundlagen. Online verfügbar unter https://d-nb.info/1105657868/34, zuletzt geprüft am 19.08.2026.

bereitgestellt und bewertet, um mit den Projektpartnern benötigte technische Anforderungen und Funktionen abzuleiten.

3.1.3 AP 1.3 Anforderungsdefinition an einen Port-Tower

Ein digitaler Zwilling eines Binnenhafens ist im Verständnis des Projekts TOLKIEN ein modular aufgebauter und erweiterbarer digitaler Repräsentant von ausgewählten physischen Objekten, Verkehrsbewegungen, Umweltzuständen oder logistischen Prozessen eines Binnenhafens (vgl. Stand der Technik, Kapitel 2). Er integriert heterogene Datenquellen, wertet diese durch Analyse- und Prognosemodelle aus und stellt die Ergebnisse Hafenbetreibern zur taktischen und strategischen Entscheidungsunterstützung bereit.

Die Anforderungen an einen digitalen Zwilling in Binnenhäfen unterscheiden sich in Abhängigkeit von der Akteursgruppe, für die ein digitaler Zwilling erstellt werden soll. Hafenbetreiber, Terminalbetreiber oder weitere im Hafen ansässige (Logistik-)Unternehmen verfolgen unterschiedliche Zielsetzungen und haben verschiedene Datenbedarfe. Im Rahmen des Projektes wurden die Anforderungen und Funktionsumfänge des Port Tower (im Folgenden auch mit der Begrifflichkeit digitaler Zwilling synonym verwendet) explizit aus der Perspektive von Hafenbetreibern definiert. Dies spiegelt sich in der Zusammensetzung des Konsortiums wider, das mit den Binnenhäfen Duisburg und Trier zwei Hafenbetreiber als Anwendungspartner umfasst. Die im Folgenden beschriebenen Anforderungen adressieren daher die spezifischen Informations- und Datenbedarfe von Hafenbetreibern hinsichtlich der Verkehrs- und Infrastruktursteuerung sowie der übergeordneten Koordination des Hafenbetriebs. Das heißt, es werden tendenziell mittel- bis langfristige (taktisch-strategische) Fragestellungen fokussiert und nicht die Optimierung von operativen Prozessen auf Ebene einzelner Terminals oder ansässiger Unternehmen. Nichtsdestotrotz gibt es Überschneidungen mit den kurzfristigeren Anforderungen von Hafenanliegern, vgl. hierzu die Datenübermittlung von Waggoninformationen des Containerterminals (Kapitel 3.4). Dies bedeutet zusammengenommen, dass keine, bzw. nur eingeschränkte, Echtzeitfunktionalitäten notwendig sind.

Die Definition der Anforderungen und Funktionsumfänge des Port-Tower basiert auf drei sich gegenseitig ergänzenden Ansätzen (Prozessaufnahme, Value Proposition Canvas und MoSCoW-Priorisierung). Im Rahmen der Prozessaufnahme (vgl. Kapitel 3.1.1) wurden Potenziale und Zielprozesse für die Business Szenarien identifiziert. Darüber hinaus wurde zu Beginn des Projekts (2022) mittels eines Value Proposition Canvas ein Abgleich zwischen den Bedürfnissen der beiden teilnehmenden Binnenhäfen und den Funktionen und Anforderungen eines Port-Towers erarbeitet. Zur Priorisierung der identifizierten Anforderungen wurde die MoSCoW-Priorisierungsmethode verwendet. MoSCoW ist ein Akronym aus **M**ust-have, **S**hould have, **Co**uld have und **W**on't have und bezeichnet in absteigender Wichtigkeit die Anforderungen, die auf jeden Fall erfüllt werden müssen. Die Priorisierung wurde im Rahmen des Konsortialtreffens in Hamburg am 07.03.2023 in einem Workshop erarbeitet (vgl. Abbildung 4).

Abbildung 4: Foto der Teilergebnisse aus dem Priorisierungsworkshops vom 07.03.2023

Ergänzend wurden die priorisierten Anforderungen mit den tatsächlich verfügbaren Sensor-Daten abgeglichen. Durch diesen Abgleich konnte sichergestellt werden, dass sich die weitere Entwicklung des Port-Tower auf die Funktionsumfänge konzentriert, die auf Basis der aus den vorhandenen und beschafften Sensoren verfügbaren Daten realisierbar sind.

Die im Rahmen des Konsortialtreffens in Hamburg erarbeitete MoSCoW-Priorisierung wurde in standortspezifischen Workshops am 25.09.2023 in Duisburg sowie am 27.09.2023 in Trier validiert und verfeinert. Dabei wurden die Anforderungen an den Port Tower entsprechend der jeweiligen Business Szenarien der beiden teilnehmenden Binnenhäfen differenziert. Für die Umsetzung im Projekt wurden die als Must-have und Should-have priorisierten Anforderungen vorgesehen.

Eine detaillierte Auflistung der aufgenommenen Anforderungen und deren Priorisierungen durch die Häfen Trier und Duisburg ist im Gesamtbericht zu finden.

3.2 AP 2 – Technische Konzeption

Die Leitung des AP 2 lag beim Fraunhofer IML, weshalb alle Arbeiten durch das IML koordiniert worden sind. Gemeinsam mit den Projektpartnern wurde an der technischen Konzeption des digitalen Zwillings gearbeitet, indem zunächst die technische Umsetzung spezifiziert wurde. Die Anforderungen an den digitalen Zwilling wurden mithilfe der identifizierten Daten in Anforderungen an die Systemarchitektur überführt. Im Verlauf des Projektes wurden die Anforderungen um die DigiTest-Daten und Möglichkeiten erweitert (AP 2.1). An der Evaluation der technischen Systemkomponenten war das IML nur peripher beteiligt, da die Installation der Sensorik in der Verantwortung der Anwendungspartner lag. Hier lag die Hauptaufgabe an der Synchronisierung der vorhandenen Informationen und Erkenntnisse zwischen den Partnern (AP 2.2). Zum Aufbau der Datenbasis für spätere Analysen wurden durch das IML Schnittstellen zu Datenquellen aufgebaut und Datenbanken auf IML-Servern eingerichtet, auf denen die abgerufenen Daten gespeichert worden sind (AP 2.3).

3.2.1 AP 2.1 Spezifikation der technischen Umsetzung

Die Spezifikation der technischen Umsetzung bezeichnet im Kontext des Projektes die Überführung der Anforderungen an den digitalen Zwilling in die Anforderungen an die Systemarchitektur. Diese Anforderungen sind zunächst auf einer allgemeinen Ebene ausgearbeitet worden. Dies bedeutet, dass noch keine konkreten Softwareprodukte oder deren Datenaustauschformate definiert worden sind, sondern die Anforderungen, welche Art von Software generell eingesetzt werden muss.

Zur Überführung der Anforderungen wurden im ersten Schritt die zu Beginn des Projektes vorhandenen Daten analysiert (eine detaillierte Beschreibung dieser Daten ist in Kapitel 3.1.2, AP 1.1 zu finden). Diese wurden, wie zuvor erwähnt, unterteilt in hafeninterne Primärdaten und öffentliche Sekundärdaten. Die Gruppen stellen jeweils andere Anforderungen an die Software.

Bei den Primärdaten handelte es sich in beiden Häfen um einmalige Datenabzüge mit historischen Daten, welche sich nicht mehr verändern und nicht mehr erweitert werden. Dies bedeutet, dass sie in der späteren Systemarchitektur nicht in Form von regelmäßigen Importen berücksichtigt werden müssen, sondern für Auswertungen direkt aus Dateien (z.B. csv) geladen und in Analyseskripten verwendet werden können. Alternativ wurde abgewogen, die Daten einmalig in eine Datenbank zu laden, was aufgrund der höheren Komplexität nicht angestrebt worden ist.

Die Sekundärdaten wurden aus öffentlichen Datenschnittstellen im Internet bezogen und müssen vor der Verwendung von diesen Schnittstellen abgerufen und gespeichert werden. Die lokale Speicherung ist notwendig, um den Datenabruf für die Analysen zu beschleunigen und um eine Historie der Daten aufzubauen. Zu Beginn des Projektes standen nicht alle Daten historisch zur Verfügung (die Pegelstände lassen sich aus dem Dienst Pegelonline erst seit Mai 2025 historisch abrufen[8]). Hieraus ergab sich die allgemeine Anforderung einer Datenbank an die Systemarchitektur. Es wurde entschieden, ein zeitreihenbasiertes System einzusetzen, da alle Sekundärdaten (grob eingeteilt in Wetterdaten, Pegelstände und Umweltdaten) zu diskreten Zeitpunkten aufgezeichnet worden sind. Dies ist der spezialisierte Anwendungsfall einer Zeitreihendatenbank.

[8] Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS): Pressemitteilungen Pegelonline, online verfügbar unter https://www.gdws.wsv.bund.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/20250522_Oegelonline.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 19.08.2026.

Im nächsten Schritt, nach der Analyse der vorhandenen Daten, wurden die Möglichkeiten der Datenauswertungen betrachtet. Diese sollten zunächst einmalig auf Basis der Primärdaten durchgeführt werden. Eine etablierte Möglichkeit hierfür stellen Jupyter-Notebooks dar, welche es ermöglichen, Programme in einzelne Blöcke aufzuteilen und diese manuell nacheinander auszuführen. Der Vorteil hierbei liegt in der Erforschbarkeit unbekannter Daten. Die Daten lassen sich einlesen, im Detail betrachten und nach Bedarf transformieren, so dass der Workflow Schritt für Schritt aufgebaut werden kann. Eine Automatisierung der Ausführung von Notebooks ist schwer umsetzbar, war für die Datenanalysen im Projekt jedoch zu Beginn auch nicht notwendig.

Im Projektverlauf wurde die technische Umsetzung immer wieder überarbeitet und verfeinert. Mit zunehmender Datenvielfalt und ergänzend definierten Anforderungen an den digitalen Zwilling mussten Spezifikationen für die Systemarchitektur erweitert werden. Die Datenvielfalt und Menge wurde insbesondere durch die Durchführung der DigiTest-Projekte SETRI und DiVer-HT erhöht. Neue Anforderungen sind aus erweiterten Nutzungsideen hervorgegangen. Hier ist beispielhaft ein E-Mail-Service zu nennen, welcher Anlieger im Hafen über Zugankünfte und -abfahrten inklusive der gefahrenen Wagen und Container informiert. Details zu diesem Service werden im Rahmen des AP 3.1 (Abschnitt 3.4.1.4) beschrieben.

3.2.2 AP 2.2 Evaluation technischer Systemkomponenten

Das Fraunhofer IML war an diesem Arbeitspaket nur in koordinierender Rolle beteiligt und hat die Erkenntnisse und Fortschritte der DigiTest-Projekte und der Arbeiten bei NautilusLog zwischen den Partnern synchronisiert und in den regelmäßigen Meetings abgefragt.

3.2.3 AP 2.3 Aufbau einer Datenbasis

Die Grundlage für die Bearbeitung des Arbeitspakets 3 (Analyse der Daten und Entwicklung von Handlungsempfehlungen) stellt eine umfassende und einen möglichst großen Zeitraum umfassende Datenbasis dar. Das Fraunhofer IML hat gemeinsam mit NautilusLog verschiedene Systeme und Datenquellen angebunden, welche durch die Trierer Hafengesellschaft und duisport zur Verfügung gestellt worden sind. Der Aufbau der Datenbasis wurde ermöglicht durch das iterative Projektvorgehen und die zeitgleiche Bearbeitung der Arbeitspakete 2 und 4 (dessen Arbeiten im folgenden Kapitel ausgeführt werden). Erste Teile der Systemarchitektur konnten auf Basis der initialen Anforderungen an den digitalen Zwilling (vgl. Kapitel 3.1.3) zeitnah umgesetzt werden und ermöglichten die Speicherung erster Sekundärdaten.

Der Aufbau der vollständigen Systemarchitektur wurde durch die Verlagerung der IoT-Sensorikinstallation in die DigiTest-Projekte gegenüber dem originalen Zeitplan verzögert, und es bestand eine Abhängigkeit von externen Partnern. Datenflüsse mussten auf Basis der neuen und zuvor unbekannten Schnittstellen neu geplant werden. Nicht alle Definitionen lagen zeitnah vor, und nicht alle Schnittstellen waren von Beginn an automatisiert auslesbar, so dass mit der automatisierten Sammlung der letzten Daten erst im Oktober 2025 begonnen werden konnte.

Zu Projektbeginn wurden die initialen Daten, die sofort zur Verfügung standen, gespeichert und ausgewertet. Es handelte sich um historische Daten zu Anläufen von Schiffen in beiden Häfen. Im Hafen Duisburg waren die Anläufe aufgeschlüsselt auf die einzelnen Hafenbereiche (intern Magazine genannt), so dass auch eventuelle mehrfache Anläufe im Hafen (Umfuhren) in den

Daten enthalten waren. Durch die Trierer Hafengesellschaft wurden Umschlagszahlen auf der Wasserstraße aus den Jahren 2000-2022 sowie Umschlagszahlen auf der Schiene aus den Jahren 2021 und 2022 zur Verfügung gestellt. Ebenfalls in Trier standen exemplarische Listen des Containerterminals zur Verfügung, welche Schiffsabfahrten und -ankünfte enthielten und eine Zuordnung der geladenen Container auf die Züge (nach Inbetriebnahme des OCR-Gates an der Schiene) ermöglichten.

Die öffentlichen Sekundärdaten wurden aus online zur Verfügung stehenden Schnittstellen bezogen. Sie wurden, wie zuvor in der Spezifikation der technischen Umsetzung ausgeführt, vor der Verwendung/Analyse abgerufen und lokal gespeichert. Das Vorgehen hängt hierbei von der Art der angebotenen Webservices ab. Die Pegelstände werden durch die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) bzw. die Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) auf dem eigenen Portal *pegelonline* zur Verfügung gestellt. Es wird ein REST-Service angeboten, welcher regelmäßig automatisiert angefragt werden kann. Die im späteren Projektverlauf ergänzte Funktion, historische Pegelstände abzurufen, wurde durch den Download einer csv-Datei realisiert. Durch den einmaligen Download der historischen Daten konnte die Datenbasis um den gesamten Projektzeitraum erweitert werden. Die Luftschadstoffe werden durch das Umweltbundesamt (UBA) bereitgestellt. Das UBA bietet ebenfalls eine REST-Schnittstelle an, wodurch die Daten analog zu den Pegelständen regelmäßig abgerufen werden können. Die Wetterdaten werden durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) angeboten. Der DWD hostet einen File-Server, auf welchem ständig aktualisierte Dateien zum Download bereitstehen. Dieser Server bietet keine Schnittstelle im eigentlichen Sinne und erschwert einen direkten Abruf der Daten. Zur Vereinfachung des Datenabrufs wurde auf die Open-Source Python-Bibliothek *wetterdienst*[9] zurückgegriffen (nicht vom DWD entwickelt), welche auf den DWD-Server zugreift, die korrekten Daten lädt und das Entpacken vornimmt. Nach dem Abruf der Daten über REST oder die *wetterdienst*-Bibliothek werden diese in Datenbanken gespeichert und stehen zur Analyse zur Verfügung. Eine genaue Beschreibung der Datenbanken und internen Datenflüsse ist im Rahmen des AP 4 (Systemarchitektur) zu finden.

Im späteren Projektverlauf wurden die Daten der DigiTest-Projekte in die Datenbasis integriert. Hierfür mussten je nach externem Unternehmen, welches die Daten liefert, Konnektoren entwickelt und in Betrieb genommen werden.

Details zu der installierten Sensorik der einzelnen Business Szenarien sind im Gesamtbericht zu finden.

[9] Gutzmann, B., & Motl, A. (2026). wetterdienst [Computer software]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.22054512, zuletzt geprüft am 25.08.2026

3.3 AP 4 – Digitale Modellierung und Softwareentwicklung

Die Leitung und Koordination des AP 4 lag bei NautilusLog. Das Fraunhofer IML hat die Systemarchitektur gemeinsam mit NautilusLog auf Basis der zuvor entwickelten Spezifikationen entwickelt (AP 4.1) und umgesetzt (AP 4.2 und AP 4.3). Nach der Systemspezifikation wurden beide Einzelteile der Architektur weitestgehend unabhängig voneinander entwickelt und am Ende zusammengeführt.

3.3.1 AP 4.1 Entwicklung einer Systemarchitektur

Zu Beginn der Entwicklung der Systemarchitektur musste die grundlegende Frage nach der Art der Architektur beantwortet werden. Um ein Software-Ökosystem zu unterstützen, welches flexibel und austauschbar voneinander unabhängige Technologien einsetzt, wurde auf eine Microservicearchitektur gesetzt. Diese wurde in zwei thematische Teile aufgeteilt, um die Entwicklung am IML und bei NautilusLog zeitgleich durchführen zu können. Jeder Teil beinhaltet wiederum mehrere gekapselte Microservices.

- Teil 1 definierte die Aspekte der Datenverarbeitung, der Modelldefinitionen, der Analysen sowie den resultierenden Handlungsempfehlungen und Hinweise als technologische Entwicklung (Fraunhofer IML)
- Teil 2 definierte die Aspekte der generellen Datenintegrationen, Workflowaussteuerung und Visualisierungen sowie eine Abbildung von Managementfunktionen als Plattformlösung (NautilusLog, siehe Gesamtbericht und Einzelbericht NautilusLog)

Durch dieses Vorgehen konnten parallel verschiedene Technologien umgesetzt werden, die zeitgleich zwischen Fraunhofer und NautilusLog im Austausch mit den Projektpartnern abgestimmt und weiterentwickelt wurden.

Innerhalb der beiden Teile wurden einzelne Bestandteile als Docker Images bereitgestellt, als Docker Container gestartet und über Schnittstellen im Ökosystem bereitgestellt. Dies ermöglichte den Einsatz von abgerufener Open-Source-Software im Zusammenspiel mit eigenen Entwicklungen und einen unabhängigen Austausch von Softwarekomponenten. Im Projekt wurde diese Abstraktion genutzt, um flexibel auf die Weiterentwicklung der Use-Cases reagieren zu können und eine saubere Trennung für die Datenhaltung und Businesslogik zu erhalten.

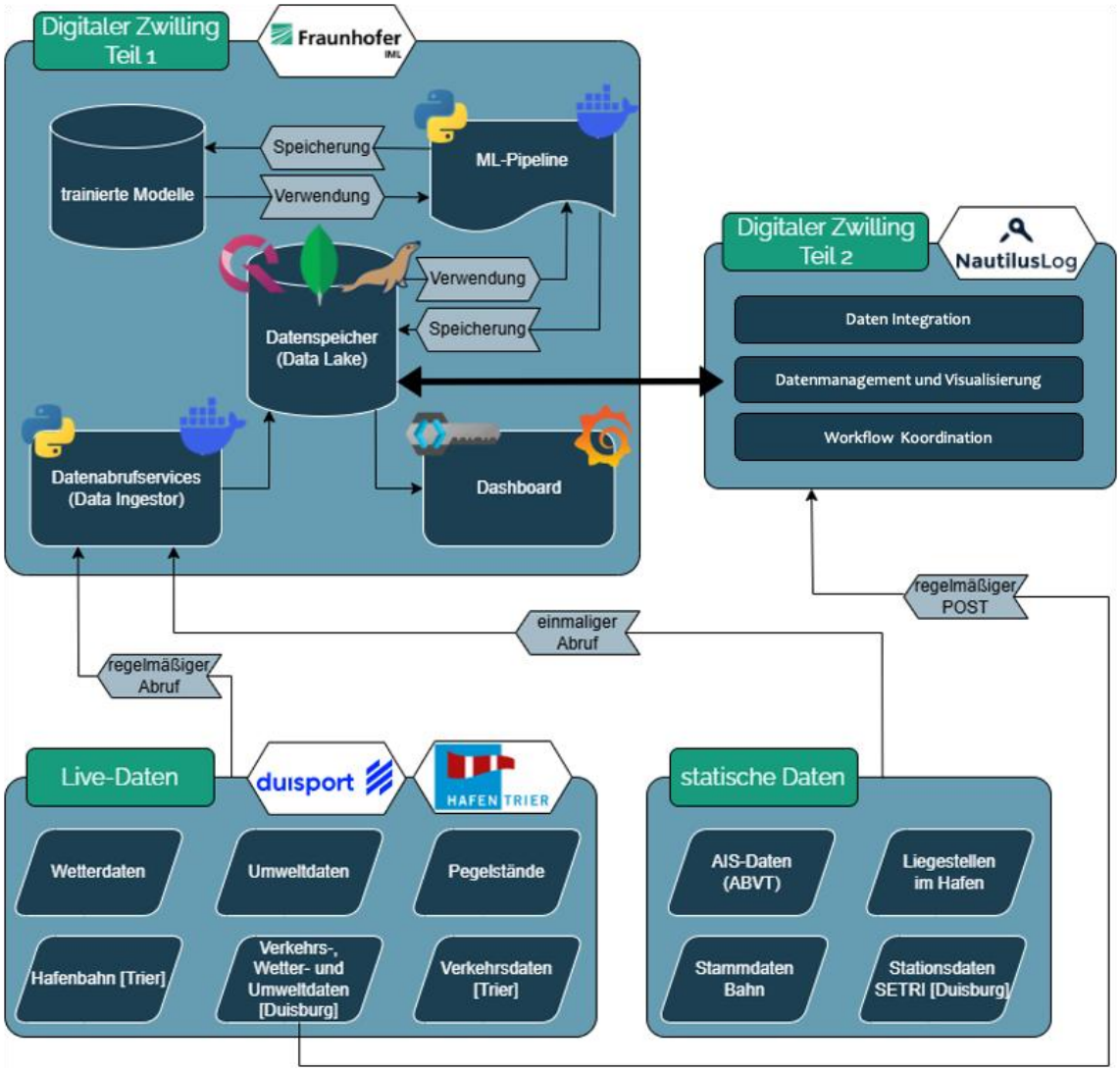

Abbildung 5: TOLKIEN Architektur mit allen Bestandteilen des digitalen Zwillings

In diesem architektonischen Design wurden sowohl die Entwicklung der Use-Cases (vgl. AP 1) als auch die technische Analyse (vgl. AP 2) parallel berücksichtigt. Ziel war es, die Businesslogik des digitalen Zwillings in Teil 1 so zu unterstützen, dass benötigte Datenquellen flexibel über Teil 2 integriert werden können. Durch die Trennung des Datenabrufes und der Bereitstellung von allgemeinen Schnittstellen von der Businesslogik sollte die Anbindungskomplexität nach außen vereinfacht und die Entwicklung der Handlungsempfehlungen gekapselt werden. Anwendungen und Sensoren sollten als Teilnehmer in die Architektur eingebunden bzw. ausgetauscht werden können, ohne dass dies einen Einfluss auf die Use-Case-Bearbeitung hatte. Allgemeiner ausgedrückt konnte sich der digitale Zwilling auf die Daten-Analyse in Teil 1 und das Daten-Management in Teil 2 konzentrieren. Der höhere initiale Aufwand dieses Vorgehens ermöglichte eine bessere Performance und eine zukunftsorientierte Effizienz durch flexible Erweiterungsmöglichkeiten.

In Abbildung 5 ist die schlussendlich umgesetzte Systemarchitektur abgebildet. Es ist zu erkennen, dass die beschriebene Trennung der beiden Teile wie geplant entwickelt wurde, die Auslagerung des Datenabrufes in den Teil 2 jedoch nicht vollständig umgesetzt worden ist. Begründet ist dies durch Zeitverzögerungen und einen höheren initialen Aufwand in der Recherche bzw. der Designabstimmung. Darüber hinaus waren viele Schnittstellendefinitionen später bekannt und

verfügbar als ursprünglich geplant. Um erste Daten abrufen zu können und Testauswertungen durchführen zu können, wurden Datenabrufservices (Data Ingestors) bereits in Teil 1 entwickelt.

In der Abbildung ist unten auf Seiten der Daten zu erkennen, dass „statische" sowie „Live"-Daten unterstützt werden. Es wurde jedoch kein Echtzeitsystem im IT-technischen Sinne umgesetzt. „Live"-Daten können auch nachträglich abgerufen werden. Die Bezeichnung sagt aus, dass es sich um zeitlich diskret aufgezeichnete Daten und Messwerte unterschiedlicher Frequenz handelt, welche nicht nachträglich verändert werden (z.B. Temperaturen alle 15 Minuten bis hin zu Beschleunigungen mit 100 Hz). Aus dieser Unterteilung ergab sich für beide Teile der Architektur, dass eine Notwendigkeit für verschiedene Kommunikations- und Datenbanktechnologien bestand (vgl. AP 2.1 und 2.2). Neben zeitreihenbasierten Datenbanken und Technologien wurden auch relationale Datenbanken eingesetzt mit dem Ziel, möglichst effizient verschiedene Daten nach den in den Use-Cases benötigten Kriterien filtern bzw. anfragen zu können.

Auf weitere Details der architektonischen Designentscheidungen wird in AP 4.3 (Softwareentwicklung) weiter eingegangen.

3.3.2 AP 4.2 Aufbau einer Entwicklungsumgebung und Entwicklungsprozess

Zum Aufbau der Entwicklungsumgebung wurden die Infrastruktur- und Prozessgrundlagen für eine effiziente Softwareentwicklung innerhalb des Projekts geschaffen. Die Entwicklungsumgebung umfasste je nach Projektpartner und Projektfortschritt andere Tools, weshalb diese laufend angepasst und erweitert wurden. Im Folgenden wird der Entwicklungsprozess am Fraunhofer IML dargestellt.

Am IML wurde die Software zum Datenabruf und zu Analysezwecken (ETL-Prozess) entwickelt (vgl. AP 3 Modellentwicklung). Hieraus ergab sich die Anforderung, schnell Daten für erste Tests verfügbar zu haben und diese auszuwerten. Im späteren Projektverlauf sollte der Datenabruf automatisiert ablaufen und die Analysen fortlaufend durchgeführt werden (vgl. Microservices der Systemarchitektur Teil 1). Der prototypische Datenabruf und erste Erkenntnisse wurden, wie in AP 2.1 spezifiziert, mit Jupyter Notebooks im Browser durchgeführt. Diese erlauben eine Aufteilung des Codes in einzeln ausführbare Blöcke, was bei der Datenexploration den Prozess stark vereinfacht. Ein Jupyter Hub zum Starten von Notebooks stand am IML bereits zur Verfügung.

Die Überführung der Notebooks in ausführbare Skripte wurde in der IDE Visual Studio Code (VS Code) durchgeführt. Mithilfe von virtuellen Umgebungen, die mit dem Tool pipenv erstellt worden sind, konnten beliebige Open-Source-Pakete installiert und verwendet werden. Die Versionierung des Quellcodes wurde mit git und einem bei Fraunhofer verfügbaren GitLab zum Austausch von Code durchgeführt. Über GitLab wurde die Zusammenarbeit im Team sichergestellt.

Ebenfalls ein Teil der Entwicklungsumgebung stellt der CI/CD-Prozess dar (Continuous Integration/ Continuous Delivery). Mithilfe von CI/CD können neue Versionen nach der Entwicklung automatisch durch Pipelines erstellt und zur Verfügung gestellt werden. Diese Pipelines sind ebenfalls eine Funktionalität von GitLab und haben aus dem Code ausführbare Docker Images erzeugt.

3.3.3 AP 4.3 Softwareentwicklung

In diesem Arbeitspaket wurden die Bestandteile des digitalen Zwillings nach den Anforderungen der Projektpartner und basierend auf der in AP 4.1 erarbeiteten Gesamtsystemarchitektur am Fraunhofer IML und bei NautilusLog entwickelt und dokumentiert.

Am IML wurden Skripte zum Datenabruf aus Schnittstellen diverser Formate entwickelt, die Codes zur Speicherung der Daten in Datenbanken geschrieben, und die Algorithmen zur Auswertung der Daten (Bearbeitung der Business Szenarien) programmiert. In diesem Abschnitt wird auf den dritten Teil (Auswertung) nicht eingegangen, da die Beschreibungen der Business Szenarien und deren Bearbeitung im folgenden Kapitel 3.4 (AP 3) zu finden sind. Grundlagen zu den nachfolgenden Ausführungen sind in Kapitel 3.2.3 (AP 2.3) zu finden.

Zum Empfang und zur Speicherung der Daten aus dem Schienen-OCR-Gate wurde ein zweistufiges Konstrukt entwickelt. Durch den Hersteller wurde vorgegeben, dass die Daten zwingend per http POST übermittelt werden müssen. Hierfür musste als erste Stufe ein Endpunkt zur Verfügung gestellt werden. Um die Nachnutzung der Entwicklungen nach Ende des Projektes und den Transfer sicherzustellen, wurde durch die Trierer Hafengesellschaft ein Debian-Linux-Server gemietet, welcher durch das IML administriert wurde und auf dem eine mit Python und FastAPI realisierte Schnittstelle zur Verfügung gestellt wurde. Nach Empfang einer Durchfahrt wird die XML-Datei zunächst in ihrer Rohform gespeichert und analysiert. Die Metadaten der Fotos der Wagen werden in einer MariaDB-Datenbank gespeichert, so dass diese schnell abrufbar und auffindbar sind. Die Fotos selbst sind im jpg-base64-Format in den XML-Dateien enthalten und verbleiben dort, sie werden nicht separat gespeichert. Um einen Zugriff von außerhalb des Servers zu ermöglichen, wurden weitere http-Endpunkte eingerichtet. Über diese lassen sich Bilder gezielt anhand der UUID abrufen, ebenso lassen sich Durchfahrten anhand ihrer ID abrufen. Die zweite Stufe stellt eine vergleichbare http-Schnittstelle beim IML dar. Diese verfügt ebenfalls über einen POST-Endpunkt. Nachdem der Debian-Server eine Durchfahrt empfangen hat, werden die Bilder zur Reduzierung der Dateigröße aus der Übertragung entfernt und die Informationen direkt an das IML weitergeleitet. Dort stehen sie nach Speicherung in einer MongoDB zur Verfügung. Alle Übertragungen werden durch Firewalls und IP-Filter oder JSON-Web-Token (JWT) gesichert.

Die Duisburger SETRI-Daten wurden zu Beginn nach jedem Datenempfang von den Sensoren durch die Rhinecloud durch selbst entwickelte Skripte an NautilusLog geschickt und durch das IML von NautilusLog abgerufen. Im Projektverlauf wurden Skripte entwickelt, die die Daten direkt aus der Duisburger Schnittstelle abrufen. Hierfür steht eine http-Schnittstelle zur Verfügung, aus der durch Parametervariation historische Daten abgerufen werden können. Dies bietet den Vorteil, dass gegenüber dem aktiven Weiterleiten der Daten durch die Cloud an NautilusLog auch auf Daten zugegriffen werden kann, die während eines eventuellen Ausfalls der empfangenden Schnittstelle verloren gegangen sind. Das Datenabrufskript wurde mit Python entwickelt, läuft in einem Docker-Container und startet regelmäßig den Abruf. Die Daten werden in QuestDB gespeichert.

Die Trierer Daten wurden analog abgerufen, es stand eine Schnittstelle zur Verfügung, welche mit Python in Docker abgefragt wurde. Durch den Betreiber der Verkehrsanalysesoftware (welcher die Kameras angebunden hat) wurde aufgezeichnet, aus welcher Richtung kommend ein Fahrzeug in welche Straße abgebogen ist. Diese Information fehlte jedoch in einem überwiegenden Teil der Datensätze, weshalb die in AP 2.3 beschriebene Datenanreicherung (Ergänzung der Fahrtrichtung) notwendig war und durch eine selbst entwickelte Auswertung der Fahrtrouten durchgeführt wurde. Start- und Endpunkt einer Fahrt standen immer zur Verfügung, weshalb die aufgezeichnete Fahrtroute „von oben“ betrachtet wurde und analog zu einem Kompass die

Fahrtrichtung von Start zu Ende ermittelt werden konnte. Daraus wurde abgeleitet, ob ein Fahrzeug in den Hafen eingefahren ist, ausgefahren ist, oder im Hafen verblieben ist.

3.4 AP 3 – Prognose und Handlungsempfehlungen

Die Arbeiten im Arbeitspaket 3 wurden durch das Fraunhofer IML geleitet und koordiniert. Aufbauend auf dem Datenpool und der IT-Infrastruktur wurden in AP 3 durch das IML Analysen und Prognosen durchgeführt, um Handlungsempfehlungen ableiten zu können. Hierfür wurde entlang der definierten Business Szenarien vorgegangen und auch business-szenarienübergreifende Synergien genutzt. Das AP wurde in zwei aufeinander aufbauenden Teilarbeitspaketen bearbeitet. Zunächst wurden für jedes Business Szenario die Zielsetzung beschrieben, die verwendete Datengrundlage dargelegt und das methodische Vorgehen definiert. Die Ergebnisse wurden interpretiert und kritisch reflektiert (AP 3.1). Darauf aufbauend werden Handlungsempfehlungen abgeleitet und vorgestellt (AP 3.2). Während der Bearbeitung wurden ermittelten Ergebnisse kontinuierlich mit den Konsortialpartnern geteilt und Feedback eingeholt.

Im Folgenden werden für jedes Business Szenario nur die Zielsetzung und Fragestellung aufgeführt, um einen Kurzüberblick zu geben. Alle detaillierten Ergebnisse inklusive der ausgearbeiteten Handlungsempfehlungen sind im Gesamtbericht dokumentiert

3.4.1 AP 3.1 Modellentwicklung

3.4.1.1 Digitale Erfassung eines Logistikareals und Monitorings von Emissionen

Das Business Szenario digitale Erfassung eines Logistikareals und Monitoring von Emissionen wurde im Duisburger Hafen umgesetzt. Darüber hinaus erfolgte ein Vergleich mit dem Business Szenario straßenseitigen Verkehrserfassung in Trier.

Ziel des Business Szenarios war die Schaffung einer konsolidierten und transparenten Grundlage für Verkehrsdaten. Die gewonnenen Analysen und Daten sollen standardisiert aufbereitet werden, um sie für weiterführende Systeme und Berichte nutzbar zu machen. Ergänzend zur verkehrlichen Datenerfassung wurde im Business Szenario der Aufbau eines Umweltmonitorings betrachtet. Ziel ist es, umweltbezogene Belastungen im Hafengebiet proaktiv zu bewerten und somit frühzeitig langfristige Trendentwicklungen, Auffälligkeiten und mögliche Belastungsschwerpunkte zu erkennen. Damit wird eine Grundlage geschaffen, um Maßnahmen zur Emissionsminderung datenbasiert zu begleiten und bei Bedarf frühzeitig gegensteuern zu können.

3.4.1.2 Digitale straßenseitige Verkehrserfassung

Das Business Szenario der digitalen straßenseitigen Verkehrserfassung wurde im Hafen Trier umgesetzt. Ziel der digitalen straßenseitigen Verkehrserfassung ist es, das Verkehrsaufkommen und die zeitlichen Verkehrsmuster im Hafen Trier auf Basis kontinuierlich erfasster Einzelfahrzeugdaten zu beschreiben. Untersucht wird, welche standort- und fahrzeugtypspezifischen Belastungsstrukturen erkennbar sind und inwieweit sich daraus Ansatzpunkte für eine binnenhafenübergreifende Übertragung von Maßnahmen ableiten lassen. Zunächst wird eine deskriptive Analyse der Daten durchgeführt, danach erfolgt eine Untersuchung, ob und unter welchen Voraussetzungen Maßnahmen binnenhafenübergreifend übertragbar sind.

3.4.1.3 Digitale wasserseitige Verkehrserfassung

Die wasserseitige Verkehrserfassung wurde für die Häfen Trier und Duisburg ausgewertet. Beide Häfen unterscheiden sich hinsichtlich Verkehrsintensität, räumlicher Struktur und betrieblichem Nutzungsmuster. Ziel der Analyse war es, AIS-basierte Daten zur wasserseitigen Verkehrserfassung so aufzubereiten, dass daraus übergeordnete Kennzahlen für Hafenbetreiber abgeleitet werden können. Der Vergleich zwischen Trier und Duisburg dient dabei der Einordnung unterschiedlicher Nutzungsprofile.

3.4.1.4 Digitale Verkehrserfassung einer Hafenbahn

Das Business Szenario der digitalen Verkehrserfassung einer Hafenbahn wurde im Hafen Trier umgesetzt. Das Ziel des Business Szenarios war die Schaffung einer Datengrundlage mit Informationen zu Zugbewegungen, die zeitnah zur Verfügung stehen und unabhängig von den manuellen monatlichen Meldungen der hafenanliegenden Unternehmen sind. Diese Datengrundlage soll, ergänzend zu den Meldungen, eine solide Abrechnungserstellung und -validierung ermöglichen. Darüber hinaus können die Erkenntnisse aus den Daten verwendet werden, um zukünftige Entwicklungen zu unterstützen. Es sollen u.a. stark genutzte und wenig genutzte Zeiträume automatisiert erfasst werden und zukünftig notwendige Kapazitäten optimal für Erweiterungen nutzen zu können. Um Prognosen über Fahrten in der Zukunft zu treffen, sollen Regelverkehre aus den erfassten Fahrten abgeleitet werden. Zur Unterstützung der hafenanliegenden Unternehmen sollte ein E-Mail-Service entwickelt werden, der basierend auf der Zugkomposition erkennt, welches Ziel eine Fahrt hat und eine Liste mit Wagen- und Containernummern nach der Durchfahrt verschickt. Alle Auswertungen verfolgen das Ziel, die Hafengesellschaft gemäß der Projektanforderungen mit Erkenntnissen und Kennzahlen zu beliefern, um den Verkehr auf der Hafenbahn besser zu verstehen und Anliegern einen Mehrwert durch Services zu bieten.

3.4.2 AP 3.2 Ableitung von Handlungsmaßnahmen und Hinweisen

Aus den Ergebnissen der Analysen des AP 3.1 wurden durch das Fraunhofer IML konkrete Handlungsmaßnahmen erarbeitet, welche den Anwendungspartnern und weiteren Hafenbetreibern zur Verfügung gestellt worden sind, um den Hafenbetrieb strategisch weiter optimieren zu können. Wie zuvor beschrieben, sind die Handlungsmaßnahmen im Gesamtbericht zu finden und werden an dieser Stelle nicht ausgeführt.

3.5 AP 5 – Evaluation und Ergebnistransfer

Die Leitung des AP 5 wurde durch den Partner duisport übernommen. Im Zuge der Projektbearbeitung wurden die Arbeiten der zuvor beschriebenen Arbeitspakete kontinuierlich evaluiert und validiert. Falls notwendig, wurden Anpassungen an den Arbeitsschritten vorgenommen. Das Fraunhofer IML hat die Business Szenarien kontinuierlich evaluiert und dabei logistische und technische Faktoren betrachtet. Im Rahmen der Datenabrufe, Analysen und dem Aufstellen von Handlungsempfehlungen wurden Maßnahmen identifiziert, welche die Projektergebnisse durch ihre Implementierung verbessert haben. Die Details dieser Arbeiten werden im Folgenden aufgeführt.

3.5.1 AP 5.1 Logistische (Business-)Szenarienevaluation

AP 5.1 diente innerhalb des Projekts der kontinuierlichen Evaluation der Ziele und Verfahren in den vier logistischen Business Szenarien (vgl. Kapitel 1), basierend auf den Anforderungen, die in Kapitel 3.1.3 erarbeitet wurden. Die in AP 3 durchgeführten Analysen sind maßgeblich von den Evaluationen und Vorstellungen von Zwischenergebnissen mitgeprägt.

Die Erkenntnisse und Anpassungsbedarfe wurden durch das Fraunhofer IML konsolidiert, mit den Anforderungen aus AP 1 abgeglichen und anhand der definierten Anforderungen eingeschätzt. Rückmeldungen mit Auswirkungen auf die Plattform und die IT-Systeme wurden entsprechend umgesetzt und in der weiteren Systementwicklung berücksichtigt.

Zu Beginn lag der Schwerpunkt auf der Anbindung und Verarbeitung der relevanten Datenquellen sowie auf der Prüfung der Datenqualität. Die Detaillierung der vier Business-Szenarien erfolgte dabei aus zwei Perspektiven. Zum einen wurden die fachlich-theoretischen Fragestellungen der beteiligten Häfen betrachtet und zum anderen die mit den verfügbaren (Sensor-)Daten tatsächlich abbildbaren Analyse- und Erkenntnispotenziale untersucht. Im Rahmen der Evaluation wurden beide Perspektiven systematisch zusammengeführt und hinsichtlich ihrer Übereinstimmungen und Abweichungen bewertet. Auf dieser Grundlage wurde ein realisierbares Vorgehen der Untersuchungen und Mehrwerte für die einzelnen Business-Szenarien konkretisiert und im Projektverlauf umgesetzt.

Parallel zur fortschreitenden Datenintegration erfolgte die detaillierte inhaltliche und methodische Ausgestaltung der Business-Szenarien. Die entwickelten Auswertungen und Prognosen sowie die daraus abgeleiteten Erkenntnisse wurden im Rahmen der Jour-Fixe, Konsortialtreffen oder bilateralen Austausche validiert und weiterentwickelt. Dabei wurde geprüft, inwieweit die datenbasierten Ergebnisse die fachlichen Fragestellungen und logistischen Entscheidungsbedarfe der Häfen adressieren. Die gewonnenen Erkenntnisse flossen kontinuierlich in die Aktualisierung der Anforderungen und die Fortschreibung des Vorgehens im Rahmen des Projekts ein.

3.5.2 AP 5.2 Technische Evaluation und Validierung

Die technische Evaluierung betraf alle Arbeiten, in denen Konzepte wie die Systemarchitektur ausgearbeitet worden sind, Schnittstellen entworfen sowie angebunden worden sind und die Datenspeicherungs- und Auswertungsskripte entwickelt worden sind. Im Folgenden werden die wesentlichen Evaluierungserkenntnisse ausgeführt, sowie die Maßnahmen, welche am IML ergriffen worden sind, um die technische Implementierung weiterzuentwickeln.

Mit fortschreitendem Projektverlauf hat sich gezeigt, dass die genutzte Zeitreihendatenbank nicht performant genug abgefragt werden konnte und sich die Administration als Herausforderung dargestellt hat. Daher wurden die Daten, welche bereits gespeichert worden sind, in ein neues Datenbankmanagementsystem (DBMS) migriert.

Die Struktur der OCR-Gate-Daten aus Trier (externe Schnittstelle des Dienstleisters) wurde im Projektverlauf durch den Hersteller angepasst. Nach dieser Anpassung mussten die Skripte zur Auswertung angepasst werden. Die Speicherung der Zugfahrten musste nicht angepasst werden, da aufgrund der dokumentenbasierten Speicherung keine Veränderung an der Datenbankstruktur notwendig waren.

Die Duisburger SETRI-Daten wurden zunächst an NautilusLog gesendet und von dort durch das IML abgerufen. Zur Vereinfachung des Datenflusses wurde der Abruf umgestaltet, so dass Daten direkt aus der Duisburger Cloud abgerufen wurden.

Updates an verwendeten Python-Bibliotheken haben regelmäßige Updates am Quellcode der Abruf- und Auswertungsskripte notwendig gemacht. Diese wurden eingepflegt, sobald Veränderungen festgestellt worden sind.

Im Rahmen der Validierung der Datenspeicherung wurde es notwendig, einen schnellen Überblick über die gespeicherten Daten zu erhalten. Daher wurde entschieden, ein internes Grafana-Dashboard aufzusetzen, in welchem die vorhandenen Daten schnell visualisiert werden können.

3.5.3 AP 5.3 Ergebnistransfer

AP 5.3 hatte das Ziel, die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse für die Anwendungspartner nutzbar zu machen und darüber hinaus in die Fachöffentlichkeit zu übertragen. Der Ergebnistransfer wurde nicht als einmalige Aktivität zum Projektende verstanden, sondern als kontinuierlicher Prozess über die gesamte Projektlaufzeit umgesetzt. Zwischenergebnisse wurden fortlaufend dokumentiert, innerhalb des Konsortiums vorgestellt und gemeinsam mit den Konsortialpartnern diskutiert. Die Ergebnisse flossen in die weitere Bearbeitung der Business Szenarien, die Softwareentwicklung und die Ableitung von Handlungsmaßnahmen ein.

Innerhalb des Konsortiums wurden die Erkenntnisse und Zwischenergebnisse im Rahmen des zweiwöchentlichen Jour-Fixes, der Präsenztreffen, themenspezifischen Workshops sowie bilateralen Abstimmungen vorgestellt. Der vorliegende Abschlussbericht führt die fachlichen, methodischen und technischen Ergebnisse zusammen. Darüber hinaus wurden die (Teil-) Ergebnisse des Projekts mit Fachabteilungen der beteiligten Häfen und im Hafen ansässigen Unternehmen besprochen. Zusätzlich wurde ein wissenschaftlicher Austausch mit weiteren IHATEC-Forschungsprojekten und Universitätslehrstühlen, die in angrenzenden Themenfeldern forschen, durchgeführt.

Über den Transfer zu den Konsortialpartnern und konsortiumsnahen Unternehmen hinaus wurden die Projektergebnisse über Messen, Fachkonferenzen, Vernetzungsveranstaltungen und Veröffentlichungen der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Hierzu zählten insbesondere die Messe transport logistic in den Jahren 2023 und 2025, die IHATEC-Vernetzungskonferenzen in Karlsruhe und Berlin sowie die IHATEC-Fachkonferenz in Bonn. Ergänzend wurde TOLKIEN auch im Rahmen von weiteren Veranstaltungen, wie bspw. im Oktober 2025 im Rahmen des Trierer Hafengeburtstags, den Inland Ports Innovation Days oder bei einem gemeinsamen Auftritt des

Konsortiums und einer Projektvorstellung auf der Future Logistics (beides 2026 in Duisburg) vorgestellt.

Die Multiplikatorwirkung wurde zusätzlich durch Beiträge im Fraunhofer-IML-Jahresbericht, im Geschäftsbericht der duisport-Gruppe, im Newsletter Verkehrslogistik und im Fraunhofer-IML-Magazin „Logistik entdecken“ unterstützt. Über die Kommunikationskanäle der Projektpartner konnten damit neben Hafenbetreibern auch Logistikunternehmen, Terminalbetreiber, Softwareanbieter, Forschungseinrichtungen und weitere Akteure aus dem Umfeld der Hafen- und Verkehrsdigitalisierung erreicht werden.

Eine vollständige Übertragbarkeit der Ergebnisse ohne Anpassungen ist im Einzelfall aufgrund unterschiedlicher Infrastrukturen, Prozesse, Akteursstrukturen und Datenquellen nicht möglich. Bei einer Anwendung an weiteren Hafenstandorten sind insbesondere lokale Schnittstellen anzubinden, Geofences und Schwellenwerte anzupassen sowie Analyse- und Prognosemodelle mit standortspezifischen Daten zu validieren. Ebenso müssen Regelungen zur Datenhoheit, zu Zugriffsrechten und zum dauerhaften Betrieb getroffen werden.

Über den Hafenbereich hinaus sind insbesondere die entwickelten Ansätze zur Integration heterogener Datenquellen übertragbar. Damit unterstützt TOLKIEN nicht nur die weitere Digitalisierung von Binnenhäfen, sondern stellt auch methodische und technische Bausteine für vergleichbare Digitalisierungsvorhaben in anderen logistischen Anwendungsfeldern bereit.

3.6 AP 6 – Projektorganisation

Die Projektorganisation wurde durch das Fraunhofer IML übernommen. Die Durchführung des Projektes erfolgte im Zeitraum Juli 2022 bis Februar 2026 (vgl. Abbildung 6). Es gliederte sich in fünf inhaltliche Arbeitspakete und ein Arbeitspaket für das Projektmanagement.

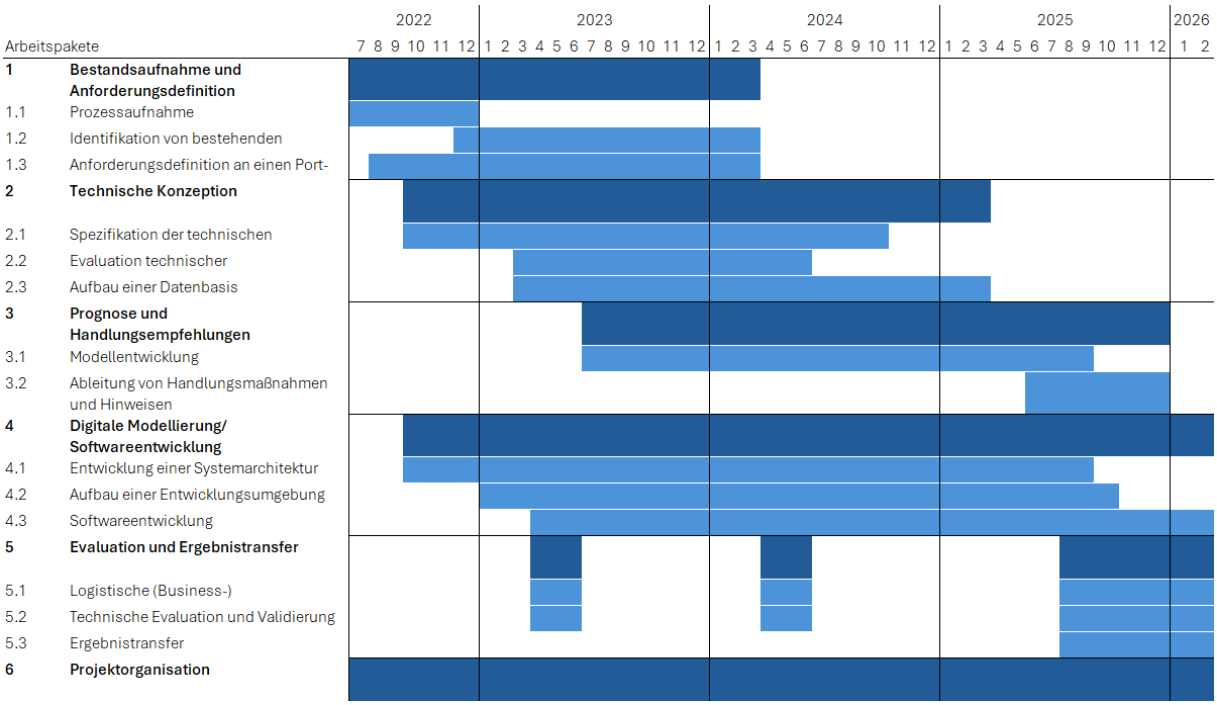

Abbildung 6: Arbeits- und Zeitplan

Im Projektverlauf fanden insgesamt 14 Präsenztreffen des Konsortiums statt. Im Mittelpunkt standen die gemeinsame Aufnahme von Prozessen, die Konkretisierung der fachlichen Anforderungen sowie die Abstimmung zur Projektumsetzung. Zusätzlich wurden Veranstaltungen, Messen und Fachkonferenzen genutzt, um sich im Rahmen des Konsortiums, und darüber hinaus mit anderen Projekten, auszutauschen und zu vernetzen.

Neben den Präsenztreffen wurden seit dem Projekt Kick-off in einem zweiwöchigen Rhythmus Jour-Fixe Termine als Videokonferenzen durchgeführt, in denen u.a. über den aktuellen Stand der Arbeiten berichtet wurde. Die regelmäßigen Abstimmungen ermöglichten die Fortschrittskontrolle, die Klärung offener Punkte sowie die Koordination der nächsten Arbeitsschritte. Darüber hinaus fanden bilaterale Abstimmungen und themenspezifische Workshops mit den Konsortialpartnern statt, um einzelne Fragestellungen vertieft zu bearbeiten und die Arbeitspakete zu konkretisieren.

4 Fazit und weiterer Forschungsbedarf

Im Verbundprojekt TOLKIEN wurde untersucht, wie heterogene Datenquellen in Binnenhäfen zusammengeführt und für einen digitalen Zwilling zur Verfügung gestellt werden können. Im Ergebnis wurden die fachlichen, methodischen und technischen Grundlagen für einen modularen und erweiterbaren digitalen Zwilling prototypisch geschaffen. Hierzu wurden Prozesse aufgenommen, Datenquellen identifiziert, Anforderungen aus Sicht der Hafenbetreiber definiert, Sensor- und Drittsysteme angebunden sowie Datenpipelines, Analyseverfahren und Visualisierungsmöglichkeiten entwickelt. Für alle vier Business Szenarien konnten der Ist-Zustand datenbasiert abgebildet, weiterführende Analysen durchgeführt und Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

Eine wesentliche Voraussetzung hierfür war der Aufbau einer geeigneten Datengrundlage. Im Hafen Trier wurden durch ein parallel durchgeführtes DigiTest-Vorhaben erstmals umfangreiche Sensorinformationen zu straßen-, schienen- und wasserseitigen Verkehrsbewegungen verfügbar. Im Duisburger Hafen konnte, ebenfalls durch ein DigiTest-Vorhaben, mithilfe des flächigen Sensoriknetzwerks erstmals eine kontinuierliche und räumlich differenzierte Betrachtung von Verkehrs-, Umwelt- und Wetterdaten innerhalb des Hafengebiets vorgenommen werden. Ergänzt wurden diese Daten durch historische interne Datenbestände, öffentliche Datenquellen, AIS-Daten sowie weitere Informationen aus hafeninternen und externen Systemen. Damit wurde die zuvor häufig auf monatlichen Meldungen, E-Mails, Einzelabfragen oder punktuellen Erhebungen beruhende Informationsgrundlage wesentlich erweitert.

Die technische Grundlage des digitalen Zwillings bildet eine modular aufgebaute Microservicearchitektur. Die Trennung von Datenintegration und Datenhaltung auf der einen sowie Analyse- und Businesslogik auf der anderen Seite ermöglicht es, Datenquellen und Auswertungsverfahren separat weiterzuentwickeln. Die Schnittstellen und Datenformate schaffen die Voraussetzung dafür, weitere Sensorkategorien und Messgrößen einzubinden bzw. das bestehende Sensoriknetzwerk zu erweitern. Die im Projekt entwickelten Skripte zur Datenaufnahme, -aufbereitung und -analyse bilden dabei das methodische Fundament des digitalen Zwillings. Ergänzend wurden Funktionen zur Visualisierung, zur Verwaltung von Assets und Zugriffsrechten sowie zu Handlungsempfehlungen umgesetzt.

Über die vier Business Szenarien hinweg zeigt sich ein gemeinsames Funktionsprinzip des digitalen Zwillings in Binnenhäfen für die Betreiber. Der digitale Zwilling dient nicht der operativen Echtzeitsteuerung, sondern der Schaffung unabhängiger Transparenz für taktisch-strategische Entscheidungen des Hafenbetreibers. Durch die digitale Erfassung wurden daraus räumlich und zeitlich differenzierte Ereignis- und Zustandsverläufe. Der digitale Zwilling schafft zunächst eine gemeinsame Faktenbasis. Prognosen, Szenarienrechnungen oder Handlungsempfehlungen bauen auf dieser Datengrundlage auf. Gerade unter diesen Bedingungen entfaltet der digitale Zwilling seinen szenarienübergreifenden Nutzen, da er für Binnenhafenbetreiber eine unternehmensübergreifende und von Unternehmensinformationen unabhängige Sicht auf die Nutzung der Hafeninfrastruktur bereitstellt. Dadurch stärkt er die Rolle des Hafenbetreibers als Infrastrukturmanager und Standortentwickler. Entscheidungen über Investitionen, Ansiedlungen, Kapazitätserweiterungen oder Verkehrsmaßnahmen können dadurch stärker auch auf erfassten Daten und weniger auf Einzelmeldungen oder Einschätzungen beruhen.

Der digitale Zwilling ist somit nicht zwingend ein zentrales operatives Steuerungssystem. Aus der Perspektive des Hafenbetreibers ist er zunächst ein Informations- und Planungssystem, das die Detailinformationen der dezentralen Hafenakteure nicht ersetzt, sondern eine davon unabhängige Entscheidungsgrundlage schafft.

Im Business Szenario zur digitalen Erfassung eines Logistikareals und zum Monitoring von Emissionen wurde gezeigt, dass sich räumliche und zeitliche Verkehrsmuster innerhalb eines großflächigen Hafengebiets kontinuierlich erfassen lassen. Belastungsspitzen und Unterschiede zwischen Ziel-, Quell- und Durchgangsverkehren konnten identifiziert und erste stationsbezogene Prognosemodelle entwickelt werden. Die gemeinsame Betrachtung von Verkehrs-, Umwelt- und Wetterdaten schafft darüber hinaus eine Grundlage, um Maßnahmen wie Slotmanagement, Verkehrslenkung, Elektrifizierung oder Verkehrsverlagerung künftig datenbasiert zu begleiten. Das entwickelte Monitoring ist dabei nicht als Ersatz für amtliche Messnetze oder rechtlich verbindliche Immissionsmessungen zu verstehen, sondern als ergänzendes Instrument zur Identifikation standortbezogener Trends und Auffälligkeiten.

Die straßenseitige Verkehrserfassung im Hafen Trier ermöglichte erstmals eine kontinuierliche Beschreibung des Verkehrsaufkommens und der Fahrzeugstruktur an den betrachteten Standorten. Der Vergleich mit Messstellen im Duisburger Hafen lieferte erste Hinweise darauf, dass funktional vergleichbare Hafenbereiche trotz unterschiedlicher Hafengröße ähnliche Tagesganglinien aufweisen können. Daraus ergibt sich die Perspektive, Standorte anhand ihrer Verkehrsmuster zu typisieren und Maßnahmen zwischen vergleichbaren Standorttypen zu übertragen. Aufgrund der bislang begrenzten Anzahl Messstellen und des limitierten Erfassungszeitraums handelt es sich hierbei jedoch um weiteren Forschungsbedarf, um diese Hypothese zu validieren.

Die AIS-basierte wasserseitige Verkehrserfassung hat gezeigt, dass unabhängig von Informationen und Daten, die durch einzelne Hafenunternehmen bereitgestellt werden müssten, Auswertungen durch die Hafenbetreiber vorgenommen werden können. Trotz der deutlichen Größenunterschiede zwischen den Häfen Trier und Duisburg konzentrierte sich in beiden Fällen ein wesentlicher Anteil der Liegezeiten auf wenige Hafenbereiche, so dass ein hotspotorientiertes Monitoring unabhängig von der Hafengröße sinnvoll erscheint. Der entwickelte Ansatz eignet sich insbesondere zur strategischen Beobachtung der wasserseitigen Infrastrukturnutzung und zur Unterstützung der Hafenentwicklungsplanung.

Für die Hafenbahn Trier wurde mit dem OCR-Gate eine belastbare Datengrundlage zu Ein- und Ausfahrten, Zugzusammensetzungen, Wagen und Containern geschaffen. Die Analysen ermöglichten die Identifikation von Regelverkehren, verkehrsstarken Zeiträumen und potenziellen Kapazitätsreserven. Mithilfe eines Clustering-Verfahrens konnten wesentliche Zugarten voneinander unterschieden werden. Darüber hinaus wurde mit dem E-Mail-Service für Zug- und Containerinformationen ein erster betrieblicher Mehrwert für einen Hafenanlieger umgesetzt, der erweiterbar ist. Gleichzeitig zeigte sich, dass eine einzelne Messstelle am Hafeneingang nicht ausreicht, um Fahrwege, Zielgleise und Rangierbewegungen innerhalb des Hafengebiets vollständig abzubilden.

Insgesamt belegen die Projektergebnisse die technische und methodische Machbarkeit eines modularen digitalen Zwillings für Binnenhäfen. Die entwickelten Grundlagen wurden offen und flexibel gestaltet, um eine Übertragung auf weitere Standorte zu ermöglichen. Gleichwohl unterscheiden sich Häfen hinsichtlich ihrer Infrastruktur, Akteursstruktur, Prozesse, Sensorik und Drittsysteme. Eine vollständige Übertragung ohne standortspezifische Anpassungen ist daher nicht zu erwarten. Insbesondere die Schnittstellen zu Sensorikherstellern, Hafenmanagementsystemen und weiteren externen Datenquellen müssen jeweils geprüft und angepasst werden.

Neben den logistischen Erkenntnissen sind auch wirtschaftliche Betrachtungen relevant. Der dauerhafte Betrieb von Sensorik, Datenplattformen und Analyseverfahren verursacht Kosten für Wartung, Schnittstellenpflege, Datenspeicherung und fachliche Betreuung. Daher sind Betriebs-

und Refinanzierungsmodelle zu entwickeln, die den Nutzen für Hafenbetreiber und Hafenanlieger berücksichtigen. Die Frage, welche digitalen (Micro-)Services den hafenansässigen Unternehmen angeboten werden können und in welchem Umfang diese bereit sind, sich an den Betriebskosten zu beteiligen, ist zu beantworten. Die daraus ableitbaren Mehrwerte und die Einbindung der Handlungsempfehlungen in bestehende Entscheidungsprozesse sind wichtige Kriterien für die Akzeptanz und Zahlungsbereitschaft.

Die Ergebnisse sind vor dem Hintergrund zu bewerten, dass ein Teil der Sensorik im Rahmen paralleler DigiTest-Projekte aufgebaut wurde und mehrere Datenquellen erst zu einem späten Zeitpunkt verfügbar waren. Durch die Kombination aus DigiTest- und IHATEC-Projekten konnte die Anzahl der Sensoren deutlich erhöht werden, was sich positiv auf das Projekt und die Ergebnisse auswirkte. Demgegenüber stand allerdings die Notwendigkeit, den in der Vorhabensbeschreibung definierten Zeitplan anzupassen. Vorteilhafter wäre eine sequenzielle Vorgehensweise gewesen, bei der zunächst im Rahmen von DigiTest und IHATEC gemeinsam die Anwendungsfälle definiert worden wären. Im Anschluss daran hätte im Rahmen von DigiTest die Implementierung und Anbindung mit Sensorik in den beteiligten Häfen erfolgen sollen, um danach im Rahmen des IHATEC-Projekts mit der Verarbeitung der gesammelten Daten fortzufahren.

TOLKIEN stellt keinen abgeschlossenen und für alle Binnenhäfen unmittelbar einsetzbaren digitalen Zwilling bereit. Das Projekt hat die wesentlichen Grundlagen geschaffen, um heterogene Hafen-, Verkehrs- und Umweltdaten in einer modularen Systemarchitektur zusammenzuführen, auszuwerten und für taktische und strategische Entscheidungen für Hafenbetreiber nutzbar zu machen. Der nächste Entwicklungsschritt besteht in der Überführung dieser prototypischen Grundlagen in den Dauerbetrieb sowie die wirtschaftliche Verwertung.

5 Quellenverzeichnis

Fuller, Aidan; Fan, Zhong; Day, Charles; Barlow, Chris (2020): Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research.

Göckel, Nicole; Müller, Patrick (2020): Entwicklung und Betrieb Digitaler Zwillinge. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (Hg.): Digitaler Zwilling. Ein virtuelles Abbild entlang des gesamten Produktlebenszyklus. München.

Gutzmann, B., & Motl, A. (2026). wetterdienst [Computer software]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.22054512, zuletzt geprüft am 25.08.2026.

Käppner, Martin; Laakmann, Frank; Stracke, Niklas (2002): Dortmunder Prozesskettenparadigma - Grundlagen. Online verfügbar unter https://d-nb.info/1105657868/34, zuletzt aufgerufen am 19.08.2026.

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J. & Sihn, W. (2018): „Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification". In: IFAC-PapersOnLine 51.11. PII: S2405896318316021, S. 1016–1022.

Metcalfe B, Boshuizen HC, Bulens J and Koehorst JJ. (2023): Digital twin maturity levels: a theoretical framework for defining capabilities and goals in the life and environmental sciences (F1000Research).

Stiller, Burkhard; Schiller, Eryk; Schmitt, Corinna (2020): An Overview of Network Communication Technologies for IoT.

Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS): Pressemitteilungen Pegelonline, online verfügbar unter https://www.gdws.wsv.bund.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/20250522_Oegelonline.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt aufgerufen am 19.08.2026.

Zentrum für die Digitalisierung des Bauwesens, BIM Deutschland: https://www.bimdeutschland.de, zuletzt aufgerufen am 19.08.2026.