

Bundesministerium für Verkehr

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Verkehr

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# SCHLUSSBERICHT

*HafenplanZen (Förderkennzeichen 19H22007B)*



**HafenplanZen - Strategische Hafenplanung auf Basis  
von digitalen Zwillingen**

**Entwicklung generischer Hafenmasterplan Simulation,  
Modellaufbau Fallstudie Hamburg**

Bundesministerium für Verkehr

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Verkehr

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# SCHLUSSBERICHT

*HafenplanZen (Förderkennzeichen 19H22007B)*

**HafenplanZen - Strategische Hafenplanung auf Basis  
von digitalen Zwillingen**

**Entwicklung generischer Hafenmasterplan Simulation,  
Modellaufbau Fallstudie Hamburg**

**HPC Hamburg Port Consulting GmbH**

Breite Straße 61  
22767 Hamburg

Tel.: +49-40-74008-0  
Fax: +49-40-74008-115  
E-Mail: [c.eckert@hpc-hamburg.de](mailto:c.eckert@hpc-hamburg.de)  
Internet: <http://www.hpc-hamburg.de>

Copyright © by HPC

16.10.2025

# INHALTSVERZEICHNIS

	<b>Seite</b>
<b>1. HINTERGRUND DES SCHLUSSBERICHTES</b>	<b>1</b>
<b>2. EINFÜHRUNG UND ZIELSTELLUNG</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Hintergrund – Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde</b>	<b>3</b>
<b>2.2 Ziel des Projektes / Aufgabenstellung</b>	<b>3</b>
2.2.1 Erstellung eines integrierten Hafenmasterplanungstools	5
2.2.2 Integration der Daten von unterschiedlich eingesetzten Technologien	7
2.2.3 Bereitstellung moderner, integrierter User Interfaces	7
2.2.4 Wissenschaftliche Ziele	8
<b>3. PLANUNG UND ABLAUF DES PROJEKTES</b>	<b>10</b>
<b>3.1 Projektablauf</b>	<b>10</b>
<b>3.2 Kurzvorstellung der Projektpartner</b>	<b>13</b>
<b>3.3 Stand der Wissenschaft und Technik zu Projektbeginn (Stand: August 2022)</b>	<b>16</b>
<b>3.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen</b>	<b>19</b>
<b>4. WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE PROJEKTERGEBNISSE<sup>20</sup></b>	
<b>4.1 Arbeitspaket 1 – Systemspezifikation</b>	<b>20</b>
4.1.1 Arbeitspaket 1.1: Anforderungsdefinition	20
4.1.2 Arbeitspaket 1.2: Systemkonzeption/ Schnittstellendefinition	20
<b>4.2 Arbeitspaket 2 – Komponentenentwicklung (generischer Prototyp)</b>	<b>22</b>
4.2.1 Arbeitspaket 2.1: Entwicklung des Hafenmasterplan Optimierers	23
4.2.2 Arbeitspaket 2.2: API-Spezifikation/ Entwicklung	27
4.2.3 Arbeitspaket 2.3: Entwicklung der Hafenmasterplan Simulation (Digitaler Zwilling)	30
4.2.4 Arbeitspaket 2.4: Entwicklung der Hafenmasterplan 3D Visualisierung	45
4.2.5 Arbeitspaket 2.5: Entwicklung der Hafenmasterplan User Interface & Reports	46
4.2.6 Arbeitspaket 2.6: Testen entlang der Sprints / System- und Integrationstests	48
<b>4.3 Arbeitspaket 3 – Fallstudie Hamburger Hafen (Pilot)</b>	<b>49</b>
4.3.1 Arbeitspaket 3.1: Definition Planungsszenario und Datensammlung	50
4.3.2 Arbeitspaket 3.2: Modellaufbau für Fallstudie	51
4.3.3 Arbeitspaket 3.3: Exemplarische Anwendung des Planungsmodells für ausgewählte Anwendungsfälle der Fallstudie	52

4.3.4	Arbeitspaket 3.4: Auswertung der Anwendungsergebnisse und Toolanpassung	53
<b>4.4</b>	<b>Arbeitspaket 4 – Transferpotential</b>	<b>54</b>
4.4.1	Arbeitspaket 4.1: Übertragbarkeit des entwickelten Verfahrens und Demonstrators auf andere Hafenstandorte	54
4.4.2	Arbeitspaket 4.2: Erweiterbarkeit des Demonstrators für andere Fragestellungen in der Logistikbranche	59
<b>4.5</b>	<b>Arbeitspaket 5 – Projektkoordination und -administration, Öffentlichkeitsarbeit</b>	<b>61</b>
4.5.1	Arbeitspaket 5.1: Projektkoordination und -administration	61
4.5.2	Arbeitspaket 5.2: Öffentlichkeitsarbeit	61
<b>5.</b>	<b>FÖRDERERFOLG</b>	<b>62</b>
5.1	Verwendung der Zuwendung des erzielten Projektergebnisses	62
5.2	Übersicht – Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	66
5.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	66
5.4	Verwertbarkeit der Projektergebnisse	67
5.4.1	Genereller Nutzen	67
5.4.2	Fortschreibung des Verwertungsplans	68
5.5	Relevante thematische Fortschritte durch Dritte	69
5.6	Durchgeführte und geplante Veröffentlichungen	69
5.7	Quantitative und/oder qualitative Effekte des Projektes	71
5.8	Bestätigung der Anreizwirkung	73
<b>6.</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b>	<b>74</b>

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Seite

---

Abbildung 1: Erster Entwurf der Architektur des geplanten Hafenmasterplanungstools mit Anbindung weiterer Systeme (exemplarisch für Hamburg ist hier SANTANA integriert); Architekturen weiterer Häfen werden konzeptionell mit einbezogen. Quelle: HPA	6
Abbildung 2: Übersicht Arbeitspakete	10
Abbildung 3 Gantt-Zeitplan des Gesamtprojektes	12
Abbildung 4: Gegenüberstellung der konventionellen und simulationsgestützten Hafenplanung. Quelle: HPA	17
Abbildung 5: Zielarchitektur des Hafenmasterplanungstools	21
Abbildung 6: Funktionsweise des simulationsbasierten Optimierers	24
Abbildung 7 Beispielhafter Knotenpunkt mit Messtellen	26
Abbildung 8: Darstellung der genutzten Anwendungen, Programmiersprachen sowie Schnittstellen	27
Abbildung 9: Auszug aus der Struktur der Input-JSON	29
Abbildung 10 Module der Verkehrssimulation	31
Abbildung 11: Typischer Aufbau von Straßen in OpenStreetMap	32
Abbildung 12: Typischer Aufbau für das Schienennetzwerk	35
Abbildung 13: Aufbau der Black Box für Hafenable	43
Abbildung 14: 3D-Darstellung der Fahrzeugbewegungen	46
Abbildung 15: Darstellung der Heatmap im Hafenplanungstool	47
Abbildung 16: Anzeige des externen Bildschirms	47
Abbildung 17 Beispielhafte Konsolenausgabe eines Durchlaufs an Unit Tests	49
Abbildung 18 Darstellung der potentiellen Hafenable für die Fallstudie	50
Abbildung 19 implementiertes Netzwerk für Steinwerder Süd	52
Abbildung 20: Bewertung der Umsetzbarkeit der Anwendungsfälle im Hafen	56
Abbildung 21: Bewertung der Umsetzbarkeit der Anwendungsfälle in der Logistik	60

## TABELLENVERZEICHNIS

	<b>Seite</b>
Tabelle 1: Projektdaten	1
Tabelle 2: Arbeitsteilung der Arbeitspakete	15
Tabelle 3: Beispielhafte Prozessreihenfolge für den Schiffsverkehr	40
Tabelle 4: Mögliche Anwendungsfälle im Hafen	54
Tabelle 5: Thematische Cluster der Funktionalitäten	55
Tabelle 6: mögliche Erfüllungslevel der Funktionalitäten	55
Tabelle 7: Mögliche Anwendungsfälle in der Logistikbranche	59

## **ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS**

---

AP	Arbeitspaket
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
CUT	Projekt Connected Urban Twins
GIS	Geoinformationssystem
HCI	Lehrstuhl für Human-Computer Interaction der Universität Hamburg
HHLA	Hamburger Hafen und Logistik AG
HPA	Hamburg Port Authority
HPC	Hamburg Port Consulting
IfOR	Institut für Operations-Research der Universität Hamburg
IHATEC	Förderprogramm für Innovative Hafentechnologien
Lkw	Lastkraftwagen
LSA	Lichtsignalanlagen
LGV	Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung
Pkw	Personenkraftwagen
POI	Point-of-Interest
VR	Virtuelle Realität

# 1. HINTERGRUND DES SCHLUSSBERICHTES

Der vorliegende Schlussbericht der HPC Hamburg Port Consulting GmbH gibt einen umfassenden Überblick über das Projekt „HafenplanZen - Strategische Hafenplanung auf Basis von digitalen Zwillingen“ (HafenplanZen) mit dem Fokus auf die von HPC durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse. Eine gesamthafte Darstellung der Projektarbeiten und -ergebnisse ist dem Verbundabschlussbericht zu entnehmen.

Das Projekt wurde im Rahmen des Förderprogramms für Innovative Hafentechnologien (IHATEC) unterstützt. Mit dem IHATEC-Förderprogramm unterstützt das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) Forschungs- und Entwicklungsprojekte, die zur Entwicklung oder Anpassung innovativer Technologien in den deutschen See- und Binnenhäfen beitragen und dabei helfen, das Umschlagaufkommen zu bewältigen und Logistikketten zu verbessern.

Die Kerndaten des Projektes können der Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Projektdaten

Arbeitsziel	Beschreibung
<b>Projektname</b>	HafenplanZen – Strategische Hafenplanung auf Basis von digitalen Zwillingen
<b>Förderkennzeichen</b>	19H22007B
<b>Projektgesamtziel</b>	Im Rahmen des Projektes wird ein Konzept für ein Tool für die strategische Hafenmasterplanung entwickelt, das auf einem Digitalen Zwilling aufsetzt. Dieses Konzept soll auf Basis eines Prototyps mit realen Daten validiert werden. Kernelemente des Tools sind Simulationen in unterschiedlichen Domänen, die einander bedingen, und ein modernes User Interface.
<b>Projektnutzen</b>	Durch das im Projekt entwickelte Hafenplanungstool wird aufgezeigt, wie eine kollaborative und digitale Hafenplanung in Zukunft aussehen könnte.
<b>Laufzeit</b>	01.11.2022 – 30.04.2025
<b>Projektauftraggeber/in</b>	Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV)
<b>Projektträger</b>	TÜV Rheinland Consulting GmbH
<b>Projektleiter/in</b>	Ulrich Baldauf, HPA Hamburg Port Authority AöR
<b>Projektpartner</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HPC Hamburg Port Consulting GmbH</li> <li>• Lehrstuhl für Human-Computer Interaction der Universität Hamburg (HCI)</li> <li>• Institut für Operations Research der Universität Hamburg (IfOR)</li> </ul>
<b>Assoziierte Partner</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niedersachsen Ports GmbH &amp; Co. KG</li> </ul>

Arbeitsziel	Beschreibung
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seehafen Kiel GmbH &amp; Co KG</li> <li>• bremenports GmbH &amp; Co. KG</li> </ul>
<b>Hauptaufgaben / Projektphasen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projektphase 1 – Systemspezifikation: 2 Arbeitspakete</li> <li>• Projektphase 2 – Komponentenentwicklung (generischer Prototyp): 6 Arbeitspakete</li> <li>• Projektphase 3 – Fallstudie Hamburger Hafen (Pilot): 4 Arbeitspakete</li> <li>• Projektphase 4 – Transferpotential: 2 Arbeitspakete</li> </ul>
<b>Projektbudget [PM]</b>	154

Die folgenden Abschnitte enthalten Informationen zu den folgenden Punkten, wobei jeweils auf die Aktivitäten, Beiträge und Ergebnisse der HPC Hamburg Port Consulting GmbH fokussiert wird. Einen gesamthaften Überblick über das Projekt gibt der Verbundabschlussbericht:

- Vorstellung der Projektstruktur (Kapitel 2);
- Übersicht des Projektablaufs (Kapitel 3);
- Darlegung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ergebnisse (Kapitel 4);
- Stellungnahme zu dem erzielten Fördererfolg (Kapitel 5); und
- Zusammenfassung der erreichten Projektergebnisse und Darstellung der nächsten Schritte (Kapitel 6).

---

## **2. EINFÜHRUNG UND ZIELSTELLUNG**

---

### **2.1 Hintergrund – Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde**

Die Planung eines Hafens mithilfe eines digitalen Tools zur Masterplanung stellt einen bedeutenden Schritt in Richtung einer effizienteren, nachhaltigeren und wirtschaftlich wettbewerbsfähigeren Hafeninfrastruktur dar. Mit einem solchen Tool lassen sich Entwicklungs- und Infrastrukturmaßnahmen, insbesondere die Gestaltung von Terminalflächen und die langfristige strategische Ausrichtung des Hafens, simulieren und analysieren. Im Rahmen des Projekts wurde ein Prototyp entwickelt, der die Funktionsweise und Einsatzmöglichkeiten der digitalen Masterplanung veranschaulicht.

Die Digitalisierung spielt dabei eine zentrale Rolle in der modernen Hafenplanung. Sie ermöglicht präzisere Analysen, effizientere Abläufe und fundiertere Entscheidungsgrundlagen, unabhängig davon, ob bereits konkrete Ergebnisse erzielt wurden. Im Vergleich zu traditionellen Planungsmethoden, die stark auf statischen Daten und manuellen Prozessen beruhen, bietet sie ein deutlich flexibleres und zukunftsfähigeres Vorgehen.

Ein typisches Problem in der Hafenplanung ist die oft isolierte Arbeitsweise der Fachbereiche. Infrastrukturplanung, Betrieb, Logistik und Umweltmanagement arbeiten häufig mit separaten Datensätzen, was die Abstimmung erschwert und die Entscheidungsprozesse verlangsamt. Ein digitales Masterplanungstool kann diese Herausforderung adressieren, indem es alle relevanten Daten auf einer zentralen Plattform bündelt und so eine einheitliche und stets aktuelle Informationsbasis für alle Abteilungen schafft. Dies erleichtert die Zusammenarbeit, unterstützt fundierte Entscheidungen und fördert effizientere Abläufe.

### **2.2 Ziel des Projektes / Aufgabenstellung**

Das übergeordnete Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, die Qualität von Hafenmasterplänen zu verbessern. Dafür sollte ein Prototyp für ein digitales Hafenmasterplanungstool entwickelt werden, das auf dem Konzept des Digitalen Zwillings basiert. Mit diesem Ansatz sollten strategische Maßnahmen präziser abgebildet und bewertet werden, um so die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Häfen künftig besser unterstützen zu können. Die Zielerreichung im Rahmen des Projekts wurde im Wesentlichen über einen Vergleich messbar gemacht. Dabei wurden Erfahrungswerte der HPA aus der herkömmlichen Hafenplanung den

Ergebnissen einer Pilotanwendung des digitalen Hafenmasterplanungstools (Prototyp) gegenübergestellt. Grundlage war eine exemplarische Fallstudie, beispielsweise zur Entwicklung einer Fläche im Hamburger Hafen. Der generische Ansatz dieses Hafenmasterplanungstools wurde dadurch sichergestellt, dass neben Hamburg auch bremenports, Seehafen Kiel und Niedersachsen Ports als assoziierte Partner in das Projekt eingebunden und Anforderungen an das Tool aus deren Sichten aufgenommen wurden.

In erster Linie wurde erforscht, ob im Gegensatz zur bisherigen manuellen und sequenziellen Herangehensweise über den Ansatz des innovativen Digitalen Zwillings die verschiedenen Kompetenzen bei der Erstellung der Hafenplanung zentral zusammengeführt und die Wechselwirkungen der unterschiedlichen Maßnahmen bereits sehr früh während der Planungen erkannt werden können. So sollten die Auswirkungen durch den Bau eines Terminals oder einer Lagerhalle auf Wasser-, Schienen- und Straßenverkehre sowie die Luft- und Wasserqualität gesamthaft berücksichtigt werden. Damit ist es möglich, die Qualität der Planung zu verbessern und widersprüchliche Szenarien oder Überlappungen rechtzeitig zu erkennen, sodass weniger nachgelagerte Anpassungen und Nachträge zur Planung notwendig sein werden.

Als weiteres Ziel sollte mit Hilfe des Digitalen Zwillings die marktnahe und kurzfristige Umsetzung von veränderten Planungsdaten unverzüglich in eine angepasste Hafenplanung umgesetzt werden können. So ist es möglich, schnell und flexibel bei Änderungen von Rahmenbedingungen bzw. falschen Annahmen zu reagieren und korrigierend einzugreifen. Die simulierten Maßnahmen können zudem während der Umsetzungsphasen laufend überprüft und so ggf. angepasst werden. In der Folge wird durch diesen innovativen Ansatz unnötige Flächenentwicklung bzw. -versiegelung vermieden (qm bebaute Hafenfläche), die Verkehrsinfrastruktur wie Schiene, Straße und Wasserwege entsprechend den aktuellen Umschlagsmengen bedarfsgerecht ausgebaut und damit Staus (Durchfluss an Verkehrsknoten, Anzahl Fahrzeuge pro Zeit) verringert und der dadurch zusätzlich hervorgerufene CO<sub>2</sub> Ausstoß (Tonnen CO<sub>2</sub> p.a.) reduziert.

Mit dem Forschungsansatz sollten die Inhalte der Hafenmasterpläne deutscher Häfen von der Bevölkerung - aber auch von den Beteiligten der Hafenwirtschaft - besser nachvollzogen und verstanden werden. Durch die angestrebte fortschrittliche Visualisierung und verbesserte Zugänglichkeit über einen Planungstisch sollte erreicht werden, dass Bürger und Politiker besser in die Hafenplanung einbezogen werden und die strategischen Maßnahmen und deren Wechselwirkungen besser verstehen und nachvollziehen können. Mit diesem Vorgehen wurde absolutes Neuland betreten, da die Szenarien in der Praxis bisher umfangreich geplant und aufbereitet werden müssen, bevor sie der Öffentlichkeit oder fachfremden Personen präsentiert werden können. Im Ergebnis wird erwartet,

dass dadurch die Akzeptanz steigt (prozentuale Zustimmung zu baulichen Veränderungen) und somit die umzusetzenden Baumaßnahmen eher mitgetragen werden, wodurch die Planungs- und Abstimmungszeiten beschleunigt werden können (Anzahl Jahre).

Mit dem Ansatz des Digitalen Zwillings sollten die bisherigen langen Prozesszeiten stark verkürzt werden. Die gleichzeitige Einbindung aller Fachbereiche, die unverzügliche Berücksichtigung neuer Rahmenbedingungen sowie die frühe Einbindung der Stakeholder und Bevölkerung sollte zu einer beschleunigten Umsetzung (Dauer in Wochen) des gesamten Planungsprozesses führen.

### **Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele des Projektes**

In dem Konsortium wurde in einem Zeitraum von zweieinhalb Jahren ein Prototyp eines digitalen, generisch anwendbaren Hafenmasterplanungstools entwickelt und mittels einer Pilot-Anwendung am Beispiel des Hamburger Hafen getestet, erforscht und evaluiert. Es wurde dabei sichergestellt, dass das digitale Hafenmasterplanungstool universell einsetzbar und für alle See- und Binnenhäfen nutzbar ist. In diesem Rahmen werden die in den folgenden Kapiteln genannten Ziele verfolgt.

#### **2.2.1 Erstellung eines integrierten Hafenmasterplanungstools**

Hauptziel des Projekts war die Konzeption, Implementierung und Bewertung eines integrierten Hafenmasterplanungstools. Auch wenn die grundsätzlichen Anforderungen an ein solches Tool erst im Rahmen des Projekts im Detail erforscht werden und daraus eine Spezifikation des Tools erstellt werden sollte, bestand bereits ein erstes Konzept für den grundsätzlichen Aufbau des Tools (siehe Abbildung 1).

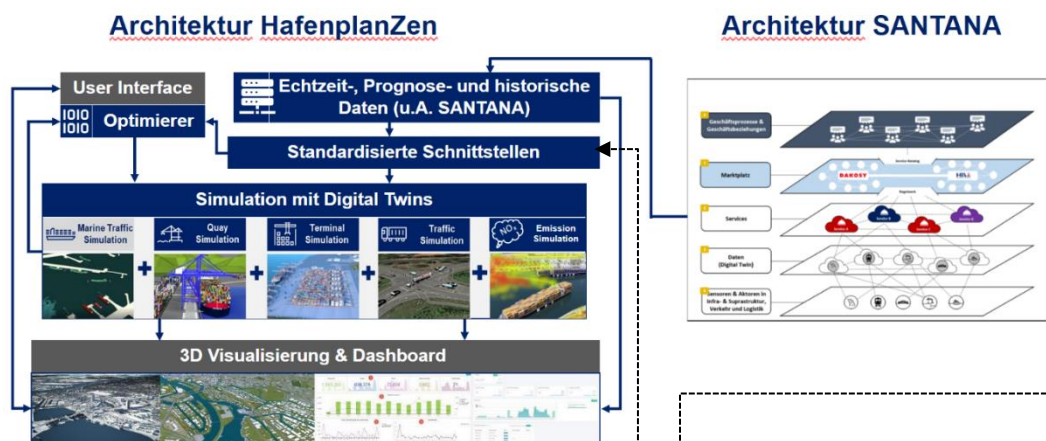


Abbildung 1: Erster Entwurf der Architektur des geplanten Hafenmasterplanungstools mit Anbindung weiterer Systeme (exemplarisch für Hamburg ist hier SANTANA integriert); Architekturen weiterer Häfen werden konzeptionell mit einbezogen. Quelle: HPA

Als Kernkomponente fungiert ein simulationsfähiger Digitaler Zwilling des betrachteten Hafens. Dieser besteht aus verschiedenen Modulen, die die Abläufe auf den unterschiedlichen Terminals sowie die Fahrzeugbewegungen (Schiffe, Lastkraftwagen, Bahn) zwischen diesen abbilden. Neben den logistischen Abläufen sollten auch weitere Aspekte wie Emissionserzeugung und -ausbreitung betrachtet werden. Um den Digitalen Zwilling an die jeweiligen Planungsfälle anzupassen, war es vorgesehen einen Optimierer zu entwickeln, der automatisiert aus den Eingangsdaten den Aufbau des Digitalen Zwillings steuert. So sollte es beispielsweise nicht länger nötig sein, die Größe und den Gerätebedarf eines Terminals basierend auf einer zukünftigen Mengenprognose händisch zu ermitteln und den Digitalen Zwilling entsprechend anzupassen. Stattdessen sollten durch den Optimierer aus den vorhandenen Daten initiale Konzepte der Terminals sowie der land- und wasserseitigen Infrastruktur erzeugt und im Digitalen Zwilling angepasst werden. Durch die simulative Analyse konnten diese initialen Konzepte bewertet und gegebenenfalls angepasst werden. Die nötigen Eingangsdaten für das Hafenmasterplanungstool sollten weitestgehend automatisiert aus verschiedenen Quellen eingelesen werden können. Dabei war vorgesehen, sowohl auf vorhandene historische Daten als auch auf Echtzeitdaten zurückzugreifen. Hierzu wurden die entsprechenden Quellen identifiziert und notwendige Schnittstellen implementiert. Als weitere Komponente sollte die nahtlose Einbindung einer 3D-Visualisierung erforscht werden. Diese hatte die Aufgabe, die Hafengeometrie, sämtliche Ein- und Ausgangsdaten sowie die Abläufe im Hafen für Spezialisten und fachfremde Personen zu visualisieren. Ein integraler Bestandteil der Forschung war es hierbei, die hochspezialisierten Daten so zu präsentieren, dass sowohl sie selbst als auch ihr Einfluss auf die Abläufe auf den ersten Blick verstanden werden können. Der damalige Planungsstand vor einer umfangreichen Analyse im Projekt sah vor, dass diese Visualisierung die

Nutzeroberfläche des Hafenmasterplanungstools darstellt, aus der heraus das Tool bedient und in der die Simulationsergebnisse beobachtet und bewertet werden konnten.

## 2.2.2 Integration der Daten von unterschiedlich eingesetzten Technologien

Für den Projekterfolg war die konsequente Nutzung der Daten von zentraler Bedeutung. Diese stammten aus vielfältigen Quellen und mussten für unterschiedliche Zielgruppen aufbereitet und visualisiert werden.

Besonders zwei Aspekte waren dabei hervorzuheben:

- **Aspekt 1 - Durchgängigkeit und Konsistenz:** Die heterogenen Daten aus verschiedenen Sensoren (z. B. AIS, Emissionen, Straßenverkehr) sowie aus operativen und strategischen Systemen unterschiedlicher deutscher Häfen sollten eindeutig verfügbar und einheitlich bereitgestellt werden („Single Point of Truth“). Dies umfasste auch Daten, die durch Simulationen erzeugt wurden.
- **Aspekt 2 - Formate:** Für die neuen Schnittstellen mussten geeignete Daten- und Übertragungsformate entwickelt und validiert werden. So war etwa sicherzustellen, dass Simulationsdaten sowohl in 3D auf einem Touchtisch als auch in virtuellen Umgebungen (VR) nutzbar gemacht werden können. Hierbei galt es zu prüfen, welche Formate die Anforderungen am besten erfüllen.

## 2.2.3 Bereitstellung moderner, integrierter User Interfaces

Je nach Use Case und Zielgruppe sollte das optimale User Interface bereitgestellt werden. Für kollaborative Phasen der Hafentplanung (z. B. Expertenmeetings oder Präsentationen für Bürger) sollte insbesondere die Nutzung eines Touchtisches erforscht werden, welcher eine simultane Interaktion mehrerer Akteure mit dem zugrundeliegenden Modell unterstützt und gleichzeitig einen weitestgehend barrierefreien Einstieg ermöglicht. Für eine egozentrische Begutachtung konkreter Standorte innerhalb des Digitalen Zwillinges sollten außerdem VR-Brillen eingesetzt werden. Sowohl Touchtische als auch VR-Brillen wurden bereits bei der HPA genutzt. Die Use Cases für Touchtische bezogen sich jedoch im Wesentlichen auf Visualisierungen von Tiefendaten. Im VR-Umfeld wurde bereits der Hamburger Hafen dargestellt, um einzelne Bauwerke und Wassertiefen zu visualisieren.

Ziel in diesem Projekt war es, diese Technologien für ein neues Tool in einem neuen Szenario anzuwenden. Ein besonderes Ziel stellte dabei die Integration der

beiden Technologien dar sowie die Integration von dynamischen Daten wie Verkehre und Emissionen.

Ein weiteres Ziel war es, die Anforderungen an die User Interfaces aus unterschiedlichen Häfen zu ermitteln und abzubilden. Zu berücksichtigen waren dabei die unterschiedlichen Größen der im Projekt beteiligten Häfen sowie der jeweils unterschiedliche Fokus in der strategischen Hafenplanung.

#### 2.2.4 Wissenschaftliche Ziele

Die Zusammenführung von heterogenen Datenquellen und -typen (d. h. historischen, aktuellen und simulierten Daten) in ein zentrales Modell zur semi-automatischen Berechnung von Planungsalternativen barg aus wissenschaftlicher Sicht Forschungspotenzial in Hinblick auf mehrere Aspekte:

- **Aspekt 1: Optimierung auf Basis einer Simulationsumgebung:** Die auf Basis des Status Quo vorgeschlagenen Änderungen an der Infrastruktur konnten das Zielsystem auch an Stellen beeinflussen, an denen aktuell keine Änderung vorgenommen wurde. Beispielsweise konnte eine Kapazitätserweiterung an einer Stelle des Straßennetzwerks nachgelagert Verstopfungen an einer anderen Stelle verursachen. Diese Auswirkungen der gewünschten Änderungen wurden durch das System zunächst simulativ ermittelt. Die Ergebnisse konnten anschließend genutzt werden, um einen Optimierungsschritt mit weiteren Änderungen vorzunehmen, durch den ungünstige Effekte, die vorher nicht erkannt worden waren, bereinigt werden konnten. Dabei konnte es erneut zu Auswirkungen auf das Zielsystem kommen, die wiederum simulativ ausgewertet werden mussten, sodass sich hieraus eine iterative Verbesserung des Gesamtsystems auf Basis der ursprünglich gewünschten Änderungen ergab.
- **Aspekt 2: Visuelle Datenaufbereitung:** Um die komplexen, mehrdimensionalen Planungs- und Entscheidungsräume anschaulich zu präsentieren, mussten spezielle Visualisierungstechniken entwickelt werden, die Anwendungsexperten kognitiv entlasteten und sie optimal in ihren Planungsaufgaben unterstützten. Hierzu wurde erforscht, wie sich verschiedene Dimensionen wie z. B. Raum, Zeit, verfügbare Ressourcen oder Emissionsvorgaben aufgabenbezogen kombinieren und unter Nutzung des dreidimensionalen Digitalen Zwillings veranschaulichen ließen. Weiterhin mussten die verschiedenen Datentypen geeignet differenziert werden, beispielsweise um Unterschiede in der Verlässlichkeit (reale vs. simulierte Daten) sichtbar und bewertbar zu machen.

- **Aspekt 3: Effiziente Interaktion:** Ziel bei der Interaktion mit dem entwickelten Hafenplanungstool war eine einfache, intuitive Handhabung trotz des hohen Grads an Datenheterogenität und -komplexität. Zu diesem Zweck wurden für die verschiedenen technischen Plattformen unterschiedliche Interaktionstechniken (z. B. Gesten, Tangibles, blickbasierte Steuerung) konzipiert und unter Einbeziehung von potenziellen Nutzern evaluiert. Auf vorhandene Interaktionstechniken konnte nur begrenzt zurückgegriffen werden, da insbesondere für Touchtische — trotz grundlegender konzeptioneller Unterschiede zu gewöhnlichen Monitoren (wie etwa dem unterschiedlichen Interaktionsraum und variierenden Perspektiven abhängig von der Positionierung von Kollaborationspartnern) — etablierte Standards fehlten und die Effizienz für kollaborative Nutzungsszenarien nicht ausreichend erforscht war. Sowohl für Touchtische als auch für VR-Brillen lag ein Forschungsfokus auf der Interaktion mit mehrdimensionalen Daten. Ein besonderes Ziel lag außerdem auf der möglichst verzögerungsfreien Reaktion der Anwendung auf Nutzereingaben, was zusätzliche Anforderungen an die beiden vorhergehenden Module (Optimierung bzw. Visualisierung) stellte.

Naturgemäß bestanden in einem so umfangreichen Forschungsprojekt mit verschiedenen Stakeholdern auch Risiken. Ein mögliches Problem für das Projekt konnte sich beispielsweise aus den unterschiedlichen Erwartungen an die Antwortzeiten des Systems ergeben. Insbesondere waren die Rechenzeiten für die Optimierungsumgebung zu lang, um deren Ergebnisse in einem VR-Ansatz direkt nutzen zu können, da bereits für eine Auswertung des Systems mindestens ein, besser mehrere Simulationsläufe durchgeführt werden mussten. Dieser Diskrepanz konnte zunächst dadurch Rechnung getragen werden, dass versucht wurde, in relativ kurzer Zeit einfache Heuristiken zum Einsatz zu bringen.

Neben den unterschiedlich langen Antwortzeiten der beschriebenen Systemkomponenten konnte sich auch die georeferenzierte Synchronisation dieser Komponenten als Problem darstellen. Hafen-Lokationen, die einen Einfluss auf die Simulationen hatten, sollten synchron auf unterschiedlichen Medien präsentiert werden. Die Hafenfläche, die gerade auf einem Touchtisch bearbeitet wurde, musste synchron auch per VR dargestellt werden.

### 3. PLANUNG UND ABLAUF DES PROJEKTES

#### 3.1 Projektablauf

Abbildung 2 zeigt den Projektablauf. Dieser gliedert sich in 5 Arbeitspakete mit insgesamt 16 Unterarbeitspaketen.

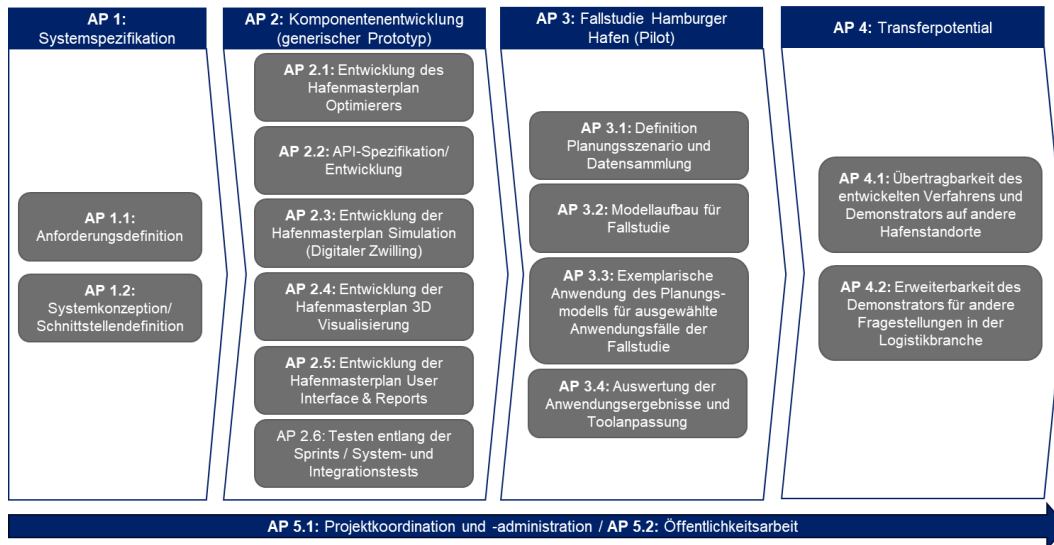


Abbildung 2: Übersicht Arbeitspakete

Im ersten Arbeitspaket wurden zunächst die Anforderungen an das Tool spezifiziert. Dies geschah durch mehrere Anforderungswshops, aus denen dann die Konzeption des Tools erstellt wurde. Mit Hilfe dieser Konzeption konnte mit der Implementierung des Tools begonnen werden.

Das zweite Arbeitspaket beschäftigte sich mit der konkreten Toolentwicklung. Es sollte ein generischer Prototyp erstellt werden, mithilfe dessen eine digitale Hafenplanung durchgeführt werden kann. Der Prototyp hat mehrere Funktionen, die im Rahmen von mehreren Arbeitspaketen entwickelt wurden. Ein Paket ist die Entwicklung des Optimierers, der bei der Planung durch Optimierungen unterstützen kann. Weiterhin mussten die in AP 1.2 definierten Schnittstellen entwickelt werden. Ein großer Teil des generischen Prototyps ist die Entwicklung der Simulation, sowie der Visualisierung der Simulation auch einem Touchtisch. Zu guter Letzt musste alles getestet und evaluiert werden.

Im dritten Arbeitspaket wurde der Prototyp anhand eines Fallbeispiels getestet. Dafür musste zunächst das Fallbeispiel ausgewählt und implementiert werden, bevor Test-User:innen es in einer Nutzer:innenstudie ausprobieren konnten. Die Ergebnisse dieser Studie wurden dann genutzt, um das Tool anzupassen.

Im vierten Arbeitspaket wurden die Transferchancen des Tools in verwandte Anwendungsgebiete abgeschätzt. Dabei wurde zwischen anderen Hafenstandorten und anderen Logistikbranchen unterschieden.

Die übergreifenden Aufgabenbereiche Projektadministration, Koordination und Öffentlichkeitsarbeit aus Arbeitspaket 5 wurden projektbegleitend und über alle Phasen hinweg durchgeführt. Abbildung 3 illustriert den zeitlichen Ablauf des Gesamtprojektes.

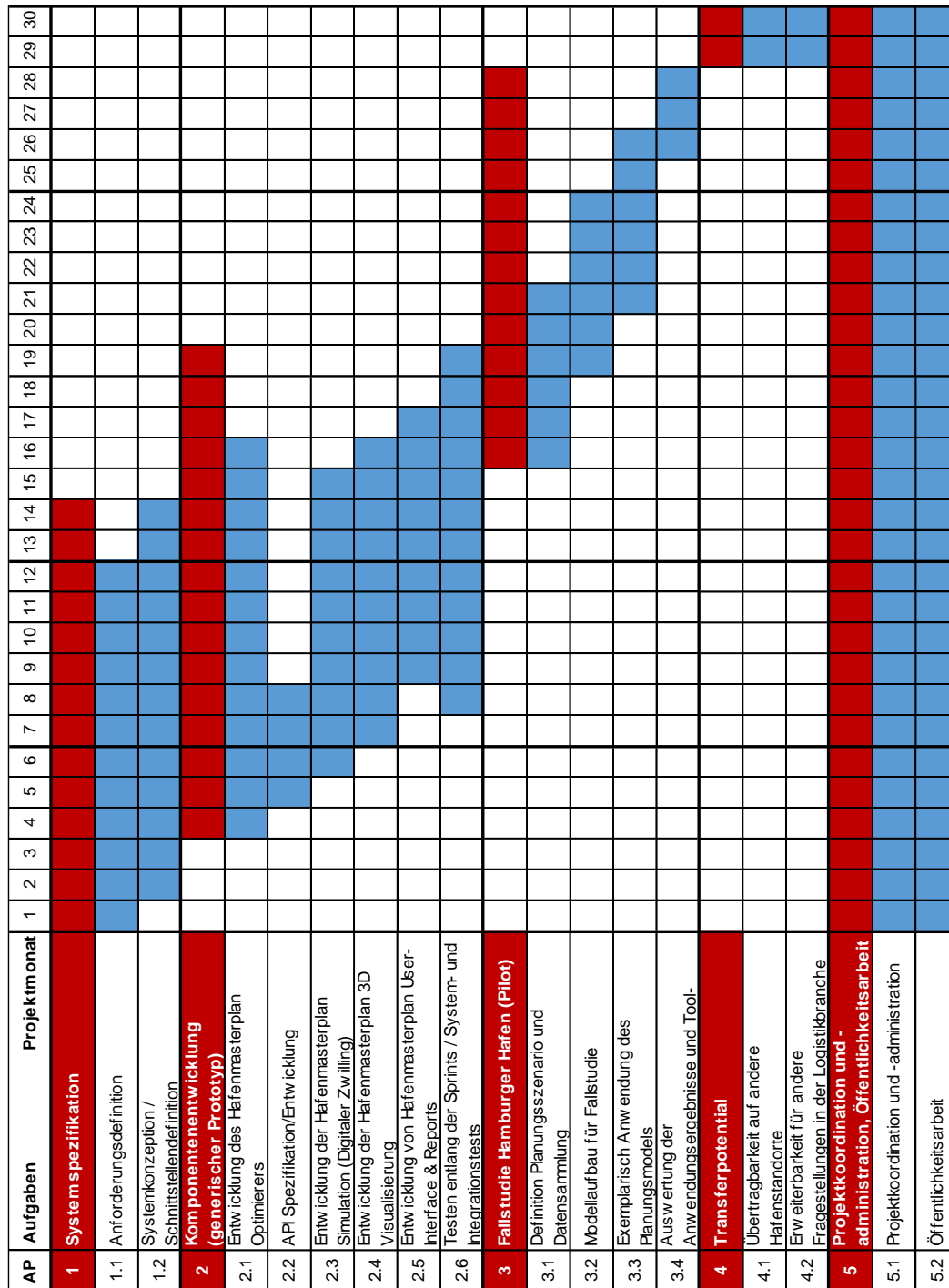


Abbildung 3 Gantt-Zeitplan des Gesamtprojektes

## 3.2 Kurzvorstellung der Projektpartner

### Hamburg Port Authority AöR (HPA)

Die Verbundkoordinatorin HPA Hamburg Port Authority AöR (HPA) plant und organisiert die Infrastruktur für den gesamten Hamburger Hafen. Sie betreibt das Hafenmanagement der Freien und Hansestadt Hamburg und ist für alle behördlichen Belange des Hamburger Hafens zuständig. Als eine Anstalt öffentlichen Rechts ist sie Eigentümerin des Großteils der Hafensfläche. Mit rund 1800 Beschäftigten ist die HPA verantwortlich für den Hafenbetrieb, die Hafentwicklung sowie die Entwicklung und Unterhaltung der Infrastruktur. Das Aufgabengebiet umfasst unter anderem die Sicherheit des Schiffsverkehrs, der Hafenbahnanlagen, des Immobilienmanagements, der wasser- und landseitigen Infrastruktur sowie die Bereitstellung der wirtschaftlichen Bedingungen im Hafen.

Innerhalb dieses Projektes übernimmt die HPA die Projektleitung und stellt somit sicher, dass der Scope des Projektes klar definiert und umgesetzt wird und dass Termine und Budget eingehalten werden. Des Weiteren bringt die HPA die fachlichen Anforderungen an das Hafenmasterplan-Tool ein und ist für das Testen der Umsetzung verantwortlich. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Sicherstellung der Schnittstellen der IT-Architektur, so dass die Daten aus den Systemen der HPA integriert werden können. Auch die Bewertung der Benutzerschnittstellen trägt die HPA bei.

### Universität Hamburg

Die Universität Hamburg (UHH)-IFOR /-HCI (Projektpartner) ist die größte Forschungs- und Bildungseinrichtung in Norddeutschland und genießt als Exzellenzuniversität international höchstes Renommee.

Das **Institut für Operations-Research der Universität Hamburg (UHH-IfOR)** ist Teil des Schwerpunkts „Operations & Supply Chain Management“ der Fakultät für Betriebswirtschaft der Universität Hamburg. Das Institut wird geleitet von Prof. Dr. Wolfgang Brüggemann und besteht aus einer internationalen Gruppe von wissenschaftlichen Mitarbeiter:innen, die Forschungsarbeiten zum Beispiel in den Bereichen „Fließbandaustaktung“, „Produktions- und Lagerhaltungsplanung (insb. von verderblichen Gütern)“ und „Verbindung von Produktion und Logistik“ erstellen. Im Rahmen des Projekts wird das Institut für Operations Research sich vorrangig mit der Entwicklung der Optimierungsumgebung, deren Einbindung in das Gesamtsystem und der Evaluation von Test- und realen Instanzen beschäftigen.

Die von Prof. Dr. Frank Steinicke geleitete Arbeitsgruppe **Human-Computer Interaction der Universität Hamburg (UHH-HCI)** (Projektpartner) Hamburg

befasst sich seit Jahren mit der intuitiven und natürlichen Interaktion im 3D-Raum, insbesondere in immersiven Umgebungen. In diesem Kontext hat die Arbeitsgruppe grundlagenorientierte Forschungs- und Entwicklungsprojekte zur natürlichen Exploration von virtuellen Umgebungen (DFG iLUI, DFG LOCUII) und zur Entwicklung und Evaluierung intuitiver Touch-basierter Lösungen (SFB/TRR 169 CML, DFG VHIVE, DFG T3D) geleitet. Die Arbeitsgruppe hat umfangreiche Erfahrungen in der Leitung von Verbundprojekten zur mensch-zentrierten Entwicklung von interaktiven Technologien und immersiven Lösungen, insbesondere im Rahmen von urbanen Stadtplanungsszenarien (IFB iPlanB, BMWi AVIGLE, DFG iMUTS). Im Rahmen des Projekts wird die Arbeitsgruppe die Entwicklung und Evaluierung der Konzepte für die Multi-Touch-Interaktion sowie der immersiven 3D-Visualisierung übernehmen.

### **HPC Hamburg Port Consulting GmbH (HPC)**

HPC Hamburg Port Consulting GmbH (HPC) (Projektpartner) zählt zu den führenden Beratungsunternehmen im weltweiten Hafen- und Transportsektor. Als Tochter der Hamburger Hafen Und Logistik AG (HHLA) berät HPC seit der Gründung im Jahre 1976 weltweit im Bereich Transportlogistik und bieten maßgeschneiderte Lösungen insbesondere für Häfen mit dem Schwerpunkt Container-Terminals an.

Basierend auf der umfangreichen Erfahrung mit Häfen und Hafendienstleistungen sowie der Simulation von Hafen- und Logistikprozessen wird HPC maßgeblich die Entwicklung des simulationsfähigen Zwillings innerhalb des zu erarbeitenden Hafenmasterplanungstools übernehmen. Dazu gehören neben der Identifikation und Dokumentation der Anforderungen an das Tool, sowie der eigentlichen Implementation, auch die Bereitstellung des Tools für die geplante Fallstudie. Dazu kann HPC auf langjährige Erfahrungen mit dem im Haus selbst entwickelten, und mittlerweile in mehr als 50 weltweiten Projekten erfolgreich eingesetzten Simulationsbausteinkasten HPCsim zurückgreifen.

Durch die langjährige Erfahrung im Bereich Hafenplanung wird HPC auch in den weiteren Arbeitstakten wertvolle Unterstützung in der Konzeption und Bewertung der Arbeitspaketinhalte liefern.

### **Arbeitsteilung innerhalb der Arbeitspakete**

Eine Übersicht über die Arbeitsteilung innerhalb der jeweiligen Arbeitspakete der drei Projektphasen ist in der folgenden Tabelle 2 ausgeführt. Jeder Projektpartner hat eine mitwirkende Aufgabe in den Arbeitspaketen, in denen er nicht hauptverantwortlich ist.

Tabelle 2: Arbeitsteilung der Arbeitspakete

AP	Bezeichnung	Lead Projektpartner
1	Systemspezifikation	HPA
1.1	Anforderungsdefinition	HPA
1.2	Systemkonzeption / Schnittstellendefinition	HPC
2	Komponentenentwicklung (generischer Prototyp)	HPC
2.1	Entwicklung des Hafemasterplan Optimierers	UHH-IfOR
2.2	API Spezifikation/Entwicklung	HPC
2.3	Entwicklung der Hafemasterplan Simulation (Digitaler Zwilling)	HPC
2.4	Entwicklung der Hafemasterplan 3D Visualisierung	UHH-HCI
2.5	Entwicklung von Hafemasterplan User-Interface & Reports	UHH-HCI
2.6	Testen entlang der Sprints / System- und Integrationstests	HPA
3	Fallstudie Hamburger Hafen (Pilot)	HPA
3.1	Definition Planungsszenario und Datensammlung	HPA
3.2	Modellaufbau für Fallstudie	HPC
3.3	Exemplarisch Anwendung des Planungsmodels	HPA
3.4	Auswertung der Anwendungsergebnisse und Tool-Anpassung	HPC
4	Transferpotential	HPC
4.1	Übertragbarkeit auf andere Hafenstandorte	HPC
4.2	Erweiterbarkeit für andere Fragestellungen in der Logistikbranche	HPC
5	Projektkoordination und -administration, Öffentlichkeitsarbeit	HPA
5.1	Projektkoordination und -administration	HPA
5.2	Öffentlichkeitsarbeit	HPA

Während die HPA als Verbundkoordinator tätig war und somit die Koordination des Projekts übernahm, war HPC hauptverantwortlich für die Entwicklung des Digitalen Zwillings und der dazugehörigen Verkehrssimulation. Die Universität Hamburg war mit ihren Instituten für die Entwicklung der Optimierer, sowie der Visualisierung des Digitalen Zwillings verantwortlich.

In den folgenden Kapiteln wird primär auf die Aktivitäten, Beiträge und Ergebnisse von HPC eingegangen.

### **3.3 Stand der Wissenschaft und Technik zu Projektbeginn (Stand: November 2022)**

Marktrecherchen zeigen, dass derzeit weder in der deutschen und europäischen noch in der internationalen Hafenindustrie derartig komplexe und innovative Verfahren und Tools, wie in dem geplanten Ansatz, existieren. Das Interesse der Hafenbetreiber an einer innovativen IT-basierten und ganzheitlichen Planungslösung ist groß. In der Praxis findet die strategische Hafen- und Verkehrsplanung mit all den oben beschriebenen Problemen und Einschränkungen statt und auch die Wissenschaft hat dieser Thematik bisher kaum Beachtung geschenkt. Dennoch gibt es Teilaspekte und Erfahrungen aus anderen Anwendungsbereichen, die als Basis für dieses Vorhaben genutzt werden:

Eine der Kernaufgaben der HPA ist die Erstellung eines Hafenentwicklungsplans im Auftrag der BWI. Abbildung 3 zeigt die strategische und die operative Ebene einer solchen Hafenplanung. Der Hafenentwicklungsplan setzt hierbei strategisch die Leitplanken und zeichnet eine Entwicklungsvision. Aus dem Plan auf strategischer Ebene werden praktische Maßnahmen zur Umsetzung auf der operativen Ebene abgeleitet. Diese Maßnahmen werden in der Regel dezentral definiert, ggf. simuliert und dann in einem manuellen Prozess auf Wechselwirkungen geprüft. Insbesondere als neuartige Alternative zu der manuellen Prüfung auf Wechselwirkungen wird vom Projektergebnis eine substantielle Qualitätssteigerung erwartet.

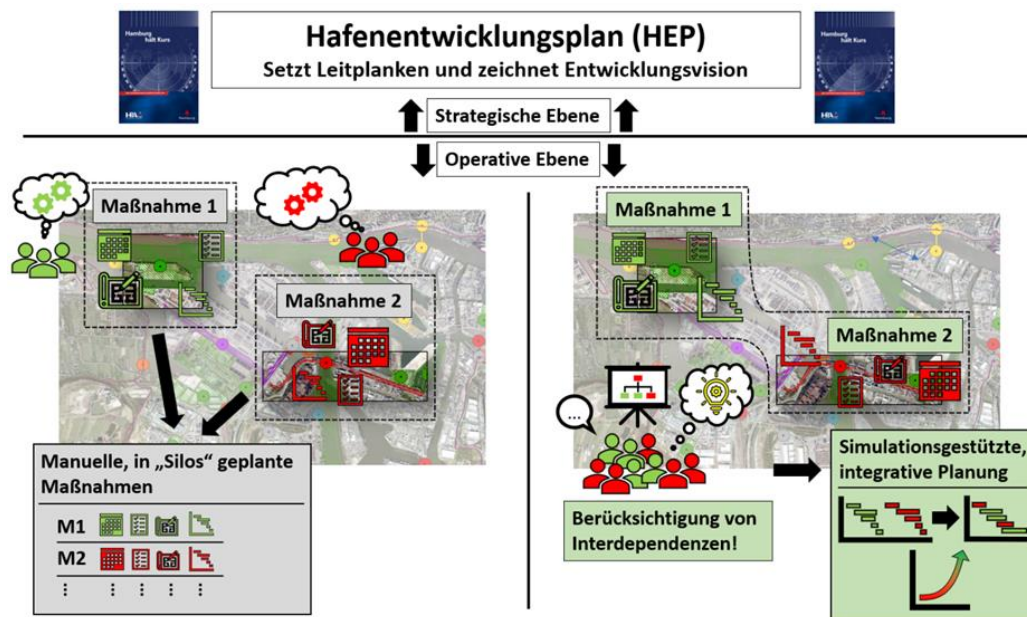


Abbildung 4: Gegenüberstellung der konventionellen und simulationsgestützten Hafenplanung. Quelle: HPA

Die HPA hat für den oben beschriebenen Toolansatz bereits Erfahrungen gesammelt und Grundlagen gelegt. Eine wesentliche Basis für ein strategisches Hafenplanungstool ist beispielsweise ein Digitaler Zwilling des Hafens. In diesem Kontext hat die HPA im Rahmen des vom BMDV aufgelegten Programms „Digitales Testfeld Hamburger Hafen“ (2018) bereits ein digitales dreidimensionales Abbild des Hamburger Hafens erstellt, welches komplett in einer Virtual Reality (VR-) Umgebung integriert ist. Des Weiteren verfügt die HPA über einen großen Fundus an Daten, die für die strategische Hafenplanung relevant sind; z.B. Schiffsbewegungen und Verweilzeiten der Schiffe an Liegeplätzen, Wassertiefen und Strömungen, Emissionskataster etc. Die HPA hat bereits erste Simulationen umgesetzt, in denen agentenbasierte Modelle genutzt werden. Prototypisch wurden die Wege der Kreuzfahrttouristen simuliert. Dieses wurde innerhalb ersten Entwurfs eines HafenStadtModells (Projekt Port City Model 2018-2020) realisiert. In die VR-Umgebung der HPA sind auch erste bewegliche Schiffe integriert. Da erfasste Daten des Hafens die Grundlage für Digitale Zwillinge darstellen, ist die HPA weiterhin auch im Projekt SANTANA (DigiTest, 2022) damit betraut, Produktivsysteme und ihre Services über Schnittstellen in einem Netzwerk der Netzwerke zusammenzuführen. Im städtischen Kontext ist die HPA im Projekt Connected Urban Twins (CUT, Förderung durch das BMWBS, 2021-2025) beteiligt. Das Projekt CUT widmet sich der Entwicklung Urbaner Digitaler Zwillinge für die integrierte Stadtentwicklung.

HPC verfügt über Vorkenntnisse und die technologische Basis im Bereich der Simulation in verschiedenen operativen Bereichen wie Schiffsverkehr,

Terminalbetrieb sowie Straßen- und Bahnverkehr, die in vielen Hafenplanungs- und Optimierungsprojekten weltweit erfolgreich angewendet wurden. Dazu hat HPC im Laufe der vergangenen Jahre den Simulationsbaustein HPCsim entwickelt, in dem verschiedenen Simulationsmodule enthalten sind. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Module zur Abbildung von See- und Intermodalterminals sowie des Schiffsverkehrs innerhalb eines Hafens und dessen Zulauf. Der Hauptfokus der Module liegt dabei bisher auf der detaillierten Abbildung einzelner Terminals selbst und nicht auf dem Zusammenspiel verschiedener Terminals und Infrastrukturanlagen im Gesamtkontext eines Hafenmasterplans.

Eine einfache Verknüpfung der vorhandenen Module zu einer gesamthaften Hafenmasterplanungssimulation scheint naheliegend, ist aber aus verschiedenen Gründen nicht möglich, bzw. bedarf größerer Anpassungen. So ist z.B. der Detaillierungsgrad und damit die zu erwartende Rechenzeit der vorhandenen Module für den Einsatz in einem Masterplanungstools viel zu hoch. Auch sind die einzelnen Module nicht darauf ausgelegt, miteinander zu kommunizieren. Nicht zuletzt sind die Module auch nur alleinstehend innerhalb der Simulationssoftware Plant Simulation nutzbar. Es ist bisher nicht vorgesehen, dass die Module mit anderen Anwendungen (wie dem im Projekt geplanten Optimierer sowie der 3D Visualisierung) zusammenarbeiten.

Ausgehend von diesen Einschränkungen werden im Rahmen des Projekts in Anlehnung an die bereits vorhandenen Module neue Module definiert und implementiert werden müssen. Diese sollen dann verknüpft und integriert werden und so einen digitalen Prozess- und Transportkapazitäts-Zwilling des Hafens schaffen. Wie oben dargestellt, sind weitere Kernelemente des geplanten digitalen Hafenmasterplanungstools der (ggf. heuristische) Optimierer und die iterative Simulation.

Am Institut für Operations Research (IfOR) der Universität Hamburg durchgeführte Forschungsprojekte in anderen Anwendungsbereichen (bspw. der Kinoprogrammplanung oder der optimalen Verteilung von Studierenden auf ihre Lehrveranstaltungsgruppen) weisen gleichwertige Herausforderungen in der Zieldefinition auf, sodass auf den ersten Blick nicht klar ist, welche Zielsetzungen in welchem Verhältnis verfolgt werden sollen und welche Rahmenbedingungen als sogenannte Hard- oder Soft-Constraints berücksichtigt werden müssen. Auch das Zusammenspiel von Optimierung und Simulation ist beispielsweise bei der Layout-Planung der Lagerblöcke eines Containerterminals bereits untersucht worden. Damit verfügt der Projektpartner IfOR über wichtige Vorkenntnisse und Erfahrungen zur Erstellung des Port Master Plan Optimierers.

Das Institut für Human-Computer Interaction der Universität Hamburg (HCI) hat eine internationale ausgewiesene Expertise im Bereich der Mensch-Computer-

Interaktion und hat bereits umfangreiche anwendungsorientierte Forschungserfahrung in der Entwicklung und Evaluierung von interaktiven Visualisierungen in urbanen Planungsszenarien gesammelt. Beispiele umfassen die interaktive 3D-Stadtplanung, die gemeinsam mit Städten in Münster und Würzburg auf Multi-Touch-Displays sowie in VR-Umgebungen realisiert wurde und als Basis für kollaborative Anwendungen zur Bewältigung von Katastrophenszenarien (z.B. Feuer oder Hochwasser) in Verbundprojekten des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) genutzt wurden.

HafenplanZen unterscheidet sich von diesen zurückliegenden Projekten insbesondere in zwei Punkten. Einerseits ist die Verknüpfung von historischen, aktuellen und simulierten Daten geplant, welche nur dann effizient genutzt werden können, wenn sowohl passende Darstellungsformen als auch geeignete Schnittstellen für Nutzereingaben zur Verfügung gestellt werden können. Dies erfordert insbesondere in Hinblick auf die Synchronisation mit dem Optimierungsmodul umfangreiche Forschungsarbeiten. Andererseits liegt eine Herausforderung in HafenplanZen in der heterogenen Natur der verschiedenen Datenquellen, welche wiederum eine Vielzahl verschiedener Visualisierungs- und Interaktionstechniken erfordert, die im Rahmen des Projekts anhand eines menschenzentrierten Modells erforscht werden müssen. Hinsichtlich der Aktivitäten anderer Akteure kann das IHATEC II Projekt "TwinSim" der EUROGATE GmbH & Co. KGaA genannt werden, welches sich mit der simulationsbasierten Optimierung der Verkehre und Umschlaggeräte auf einem Hamburger Terminal befasst. Das Projekt HafenplanZen hingegen umfasst die durch eine Hafenbehörde zu leistende gesamthafte Hafenplanung einschließlich der Verkehrsinfrastruktur an Land und auf der Wasserseite und verfolgt u.a. die intensive Einbindung der öffentlichen Interessen von Seiten der Bevölkerung, der Politik und der Umwelt.

### **3.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Das Vorhaben HafenplanZen wurde im Rahmen einer partnerschaftlichen Zusammenarbeit aller Projektbeteiligten durchgeführt.

Zur Koordination des Projekts und zur gemeinsamen Bewertung von Zwischenergebnissen wurden alle zwei Wochen Videokonferenzen unter Beteiligung der Projektpartner durchgeführt. Zusätzlich fanden bei Bedarf persönliche oder virtuelle Treffen mit den jeweiligen Partnern statt, um fachspezifische Themen der Projektarbeit im direkten Austausch zu besprechen.

---

## 4. WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE PROJEKTERGEBNISSE

---

### 4.1 Arbeitspaket 1 – Systemspezifikation

Das Arbeitspaket 1 hat das übergeordnete Ziel, die Anforderungen an das System zu definieren und dokumentieren. Unter Berücksichtigung der subsystemspezifischen Schnittstellen sind die Anforderungen in User Stories für die Entwicklung kondensiert.

#### 4.1.1 Arbeitspaket 1.1: Anforderungsdefinition

Ziel dieses Arbeitspakets ist eine Liste an Anforderungen an ein Hafenmasterplanungstool, welche in Workshops mit verschiedenen Stakeholdern der strategischen Hafenplanung ermittelt wurde. Diese technischen und fachlichen Anforderungen sollten in Form von User-Stories aufbereitet sein.

Dieses Arbeitspaket wurde federführend durch die HPA durchgeführt. HPC hat hierbei durch ihre jahrelange Erfahrung in vielen unterschiedlichen Häfen unterstützt. Insbesondere hat sich HPC während der von der HPA durchgeführten Anforderungswshops auf die Umsetzung der Anforderungen an die Simulation des Tools fokussiert. Aus diesen Anforderungswshops sowie darauffolgenden internen Workshops sind etwa 120 User-Stories entstanden.

Eine umfassende Darstellung des Vorgehens und der Ergebnisse dieses Arbeitspaketes ist im Verbundabschlussbericht zu finden.

#### 4.1.2 Arbeitspaket 1.2: Systemkonzeption/ Schnittstellendefinition

Um die Anforderungen, die in AP 1.1 ermittelt wurden, in ein Konzept zu überführen, musste zunächst geklärt werden, welche einzelnen Module es im Hafenmasterplanungstool geben wird, was deren Funktion sein wird und wie die Kommunikation zwischen den Modulen aussehen wird. Um dies zu klären, gab es mehrere Workshops mit allen Projektpartnern, woraus sich folgende Zielarchitektur ergeben hat:

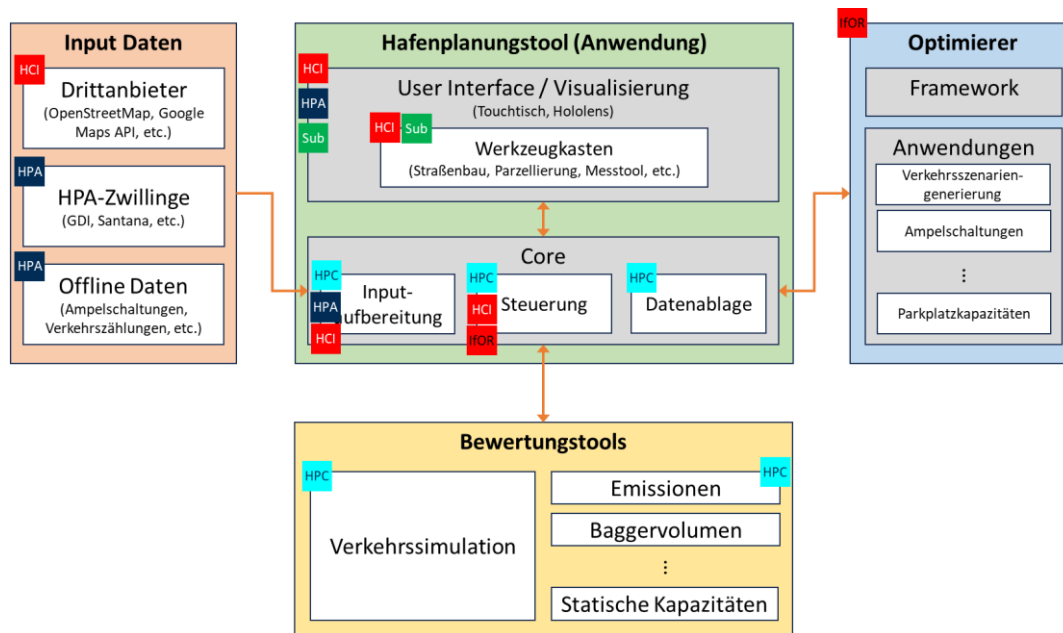


Abbildung 5: Zielarchitektur des Hafenmasterplanungstools

Die Zielarchitektur sieht vor, dass das Tool aus vier Hauptbestandteilen besteht:

- Hafenplanungstool
- Inputdaten
- Bewertungstools
- Optimierer

Das **Hafenplanungstool** besteht aus zwei größeren Modulen: dem User Interface bzw. Visualisierung und dem sogenannten Core. Die Visualisierung ist die Schnittstelle zur anwendenden Person, die auf dem Touchtisch einen Hafenmasterplan mithilfe eines Werkzeugkastens erstellen kann. Hier kann entweder direkt geplant werden oder eine existierende Planung angeschaut und weitergeplant werden. Jegliche Kommunikation der Visualisierung findet mit dem Core statt. Dieser ist das Herzstück der Anwendung und besitzt drei Subsysteme: Inputaufbereitung, Steuerung und Datenablage. In der Inputaufbereitung werden alle für die Planung benötigten extern vorhandenen Informationen eingelesen und aufbereitet. Die Steuerung startet im Auftrag der anwendenden Person das gewünschte Modul/Tool. Die Datenablage organisiert das Speichern und Abrufen von Planungsszenarien und -ergebnissen.

Die **Inputdaten** wurden in drei Kategorien unterteilt. Eine dieser Kategorien beinhaltet alle Daten von Drittanbietern. Im Fall des Planungstools sind es aktuell OpenStreetMap zur Erstellung des Straßennetzwerkes sowie die Google Maps 3D Tiles API zur Erstellung des Hintergrundbildes in der Visualisierung. Eine weitere

Kategorie sind die Datenbanken der HPA, wie die Geodateninfrastruktur. Die letzte Kategorie beinhaltet alle Offline-Daten, die als statische Datei abgespeichert sind.

Das Modul der **Bewertungstools** ist aus dem in Arbeitspaket 2.3 der Vorhabenbeschreibung beschriebenen „Hafenmasterplan Simulation (Digitaler Zwilling)“ hervorgegangen. Bei der Bewertung der Anforderungen aus AP 1.1 und der daraus folgenden Spezifikation der einzelnen Module wurde festgestellt, dass nur das Simulationstool der Verkehrssimulation ausreicht. Daher wurde dieses Modul in Bewertungstools umbenannt, welches aus mehreren Tools besteht. Die Verkehrssimulation (ehemals „Hafenmasterplan Simulation“) stellt hierbei das größte und wichtigste Tool. Sie simuliert die Auswirkungen der Planung des Hafensareals auf den Verkehr. Zusätzlich zur Verkehrssimulation gibt es mit der Emissionsberechnung noch ein weiteres Tool. Es sind auch noch weitere Tools möglich, die die Planung bewerten und unterstützen sollen: Beispiele hierfür sind Die Berechnung von Baggervolumen bei Veränderung der Hafensareale oder eine Berechnung der statischen Kapazitäten des Areals anhand von verschiedenen Parametern. Die Bewertungstools werden vom Core angesteuert. Als Dateiformat für den Informationsaustausch zu diesen Tools wurde das Dateiformat JavaScript Object Notation (JSON) gewählt. JSON ist ein frei verfügbares Datenformat, welches einerseits von Menschen lesbar, aber auch unabhängig von der verwendeten Programmiersprache und dadurch universal im Tool einsetzbar ist.

Das letzte Modul ist der Optimierer. Er unterstützt die Planung durch die Optimierung verschiedener Fragestellungen. Im Projekt umgesetzte Beispiele sind hierbei die Generierung eines Verkehrsszenarios und die Optimierung von Ampelschaltungen.

Im Laufe des Projekts wurden die Schnittstellen im Hafenplanungstool an die jeweiligen Anforderungen der einzelnen Komponenten angepasst. Die Visualisierung besitzt Schnittstellen zu frei zugänglichen Datenquellen, wie die Google Maps 3D Tiles API oder OpenStreetMap, aber auch proprietäre 3D Gebäudemodelle des LGV Hamburg sowie an das Geoinformationssystem (GIS) der HPA.

Der genaue Aufbau der Schnittstellen ist in Kapitel 4.2.2 zu finden.

## **4.2 Arbeitspaket 2 – Komponentenentwicklung (generischer Prototyp)**

Im zweiten Arbeitspaket wurde anhand der Zielarchitektur und der Ergebnisse des Anforderungsworkshops ein generischer Prototyp eines Hafenmasterplanungstools entwickelt, welcher in den folgenden Unterarbeitspaketen beschrieben wird.

#### **4.2.1   Arbeitspaket 2.1: Entwicklung des Hafenmasterplan Optimierers**

Ziel dieses Arbeitspaket war die Entwicklung eines „Optimierers“ für das Hafenmasterplanungstool, welcher mit der Verkehrssimulation kommuniziert und Parametereinstellungen für bestimmte Fragestellungen optimieren kann. IFOR agierte als Hauptverantwortlicher für das Arbeitspaket. Durch die starke Verknüpfung mit der Verkehrssimulation gab es jedoch viele Punkte, bei denen HPC die Simulationsseite anpassen musste, aber auch durch das Domänenwissen unterstützend tätig war.

Zunächst kam die Frage auf, welche Arten von Optimierung es geben wird. Hierbei kamen zwei verschiedene Funktionsweisen auf:

- Simulationsbasierte Optimierung von globalen Fragestellungen, welche anhand von mehreren Simulationen durchgeführt wird (Outer-Loop Optimierung).
- Simulationsinterne Optimierung von kleineren Inputs, die während der Simulation aufgerufen werden (Inner-Loop Optimierung).

Die Funktionsweise der simulationsbasierten Optimierung von globalen Fragestellungen ist so, dass es eine Fragestellung gibt, bei der das Optimierungstool mehrere Simulationen laufen lässt und mithilfe von Heuristiken, die optimale Parametereinstellung für die spezifische Fragestellung ermittelt. Folgende Abbildung 6 zeigt die Funktionsweise des simulationsbasierten Optimierers:

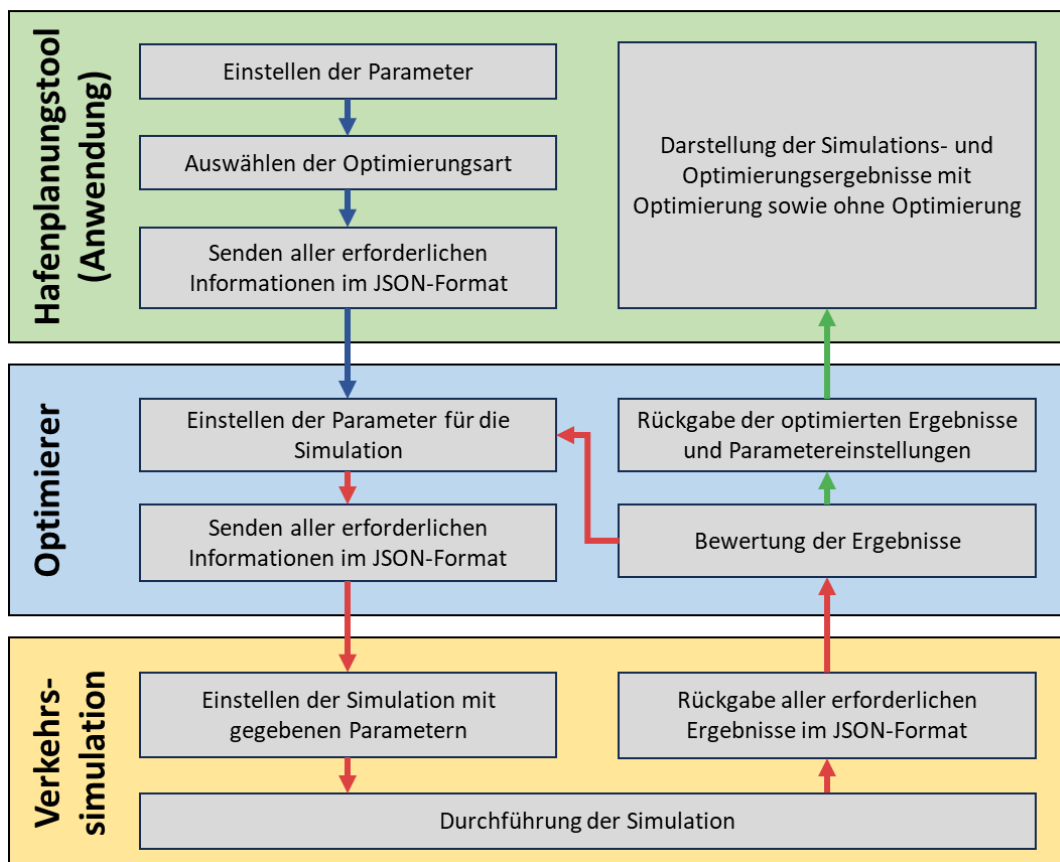


Abbildung 6: Funktionsweise des simulationsbasierten Optimierers

Der User legt zunächst die Parametereinstellungen fest, welcher der Optimierung zugrunde liegen sollen und wählt anschließend die gewünschte Art der Optimierung. Anschließend werden alle Informationen an den simulationsbasierten Optimierer geschickt, welche dann die gewollte Optimierung anstößt. Zunächst werden die Parameter für die Simulation durch den simulationsbasierten Optimierer angepasst und an die Simulation geschickt. Hierfür startet der Optimierer mithilfe der COM-Schnittstelle die Simulationsläufe (siehe Kapitel 4.2.2 für nähere Infos zu den Schnittstellen). Die Simulation übernimmt dann die Parameter, setzt das Simulationsmodell auf und führt die Simulation durch. Sobald die Simulation durchgelaufen ist, schickt die Simulation die Ergebnisse zurück. Anschließend werden die Ergebnisse geprüft und bewertet. Ist noch keine optimale Lösung gefunden (rote Pfeile), werden die Parameter für die Simulation angepasst und es wird ein neuer Lauf gestartet. Es werden so lange neue Simulationsläufe gestartet, bis keine Verbesserung der Ergebnisse mehr zu verzeichnen ist. Damit ist das „optimale Ergebnis gefunden (grüne Pfeile). Die Parametereinstellungen sowie die Ergebnisse der Simulation werden wieder an das Planungstool geschickt, welches die Ergebnisse der Optimierung anzeigt.

HPC hat zusammen mit dem IFOR überlegt, welche Art von simulationsbasierter Optimierung für den Prototyp sinnvoll wäre. Es gab mehrere Ideen, wie beispielsweise eine Optimierung von Abfertigungsstellen für Trucks in der geplanten Fläche, eine Optimierung von Aufstellflächen auf dem Areal, sowie eine Optimierung der Lichtsignalanlagen (LSA). Da ein Hauptziel des Tools die Bewertung des Straßenverkehrs war, wurde entschieden, dass die LSA das größte Optimierungspotential besitzen. Aufgrund einer Veränderung/Steigerung der einzelnen Verkehrsströme durch eine Umnutzung von Hafenflächen kann es sein, dass die aktuelle Schaltung der einzelnen Ampeln nicht mehr den Anforderungen des Verkehrsaufkommens entsprechen und angepasst werden sollten. Hier setzt die Optimierung an. Sie erstellt mehrere Simulationsläufe mit unterschiedlichen validen Ampelschaltungen, lässt diese laufen und analysiert die Ergebnisse, bis das beste Ergebnis gefunden wird. Aktuell gibt es zwei Ziele nach denen optimiert werden kann: mittlere Wartezeit der Fahrzeuge und die Emissionen der Fahrzeuge. HPC hat hierbei dem IFOR die Schnittstelle zur Verkehrssimulation bereitgestellt und diese so weit angepasst, dass alle benötigten Ergebnisse erstellt werden können.

Die simulationsinterne Optimierung von kleineren Inputs hingegen hat ein anderes Ziel. Hier werden Simulationsinterne Fragestellungen optimiert. Dafür ruft die Simulation den simulationsinternen Optimierer über eine C-Schnittstelle auf. Dabei übergibt die Simulation die benötigten Parameter und nutzt die Ergebnisse des simulationsinternen Optimierers für die weitere Simulation.

Ein implementiertes Beispiel für diese simulationsinterne Optimierung ist die Erstellung eines Szenarios für den bestehenden Straßenverkehr bei dem aus punktuellen Verkehrszählungen im Hamburger Hafen eine Vielzahl realistischer Einzelfahrten (A-B Relation) für die Simulation erstellt wird, deren Gesamtheit den Verkehrszählungen an allen Messpunkten entsprechen muss. Folgende Abbildung zeigt das Problem:

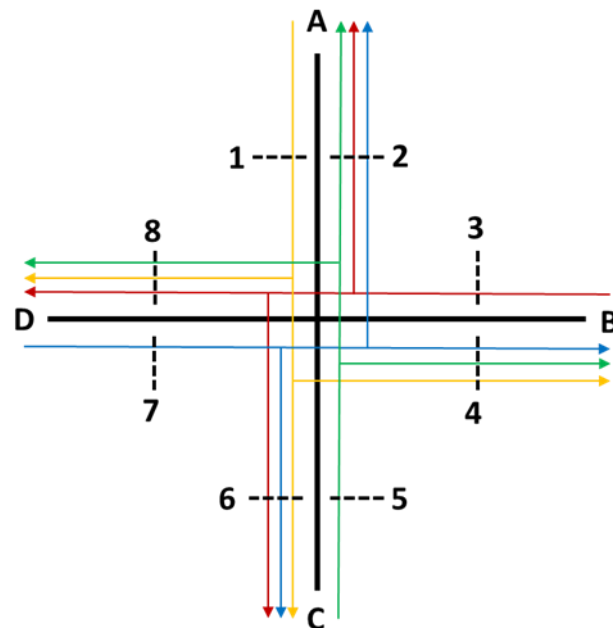


Abbildung 7 Beispielhafter Knotenpunkt mit Messtellen

Der bestehende Straßenverkehr wird anhand von Verkehrszählungen an bestimmten Knoten als Input für die Simulation bereitgestellt. In diesem beispielhaften Knotenpunkt sind es acht Zählstellen 1-8. Die Kunst besteht nun darin aus diesen Verkehrszählungen herauszufinden, welche Route die einzelnen Fahrzeuge nehmen. Bei einem Knotenpunkt wirkt das Problem noch sehr einfach, wenn es aber mehrere Knoten und Verkehrszählpunkte gibt, wird das Problem beliebig komplex. Daher wird hier auf eine simulationsinterne Optimierung zurückgegriffen, welche anhand der Verkehrszählungen, den Fahrzeugen spezifische Routen mitgibt. HPC übernahm hierbei in Zusammenarbeit mit IFOR die Konzeptionierung dieser Optimierung, sowie die Einbettung der Optimierung in das Simulationstool. Im Laufe der Implementierung der Fallstudie kam es zu dem Fall, dass die Verkehrszählungen nicht vollständig zueinander gepasst haben. Daher musste die Optimierung hier so angepasst werden, dass kleine Unstimmigkeiten in den Eingabedaten nicht zu einem Fehler führen, sondern dennoch ein Ergebnis zurückgeben.

Weiterhin gibt es noch weitere Konzepte zur simulationsinternen Optimierung kleinerer Probleme, wie die Erstellung des neuen Verkehrs durch eine neue Hafenanfläche, speziell die Generierung eines Schiffsfahrplans aus den geplanten Mengen dieser Hafenanfläche, die zwar schon konzeptioniert, aber noch nicht umgesetzt sind.

Eine umfassende Darstellung des Vorgehens und der Ergebnisse dieses Arbeitspaketes ist im Verbundabschlussbericht zu finden.

## 4.2.2 Arbeitspaket 2.2: API-Spezifikation/ Entwicklung

Ziel dieses Arbeitspaket war, dass alle erforderlichen Schnittstellen zwischen den Einzelkomponenten des digitalen Hafenmasterplanungstools spezifiziert und implementiert sind, sodass die Komponenten miteinander kommunizieren können.

Je nach Bedarf gibt es unterschiedliche Schnittstellen zwischen den Komponenten. Die folgende Abbildung zeigt die genutzten Anwendungen und Programmiersprachen, sowie die Schnittstellen zwischen den einzelnen Modulen.

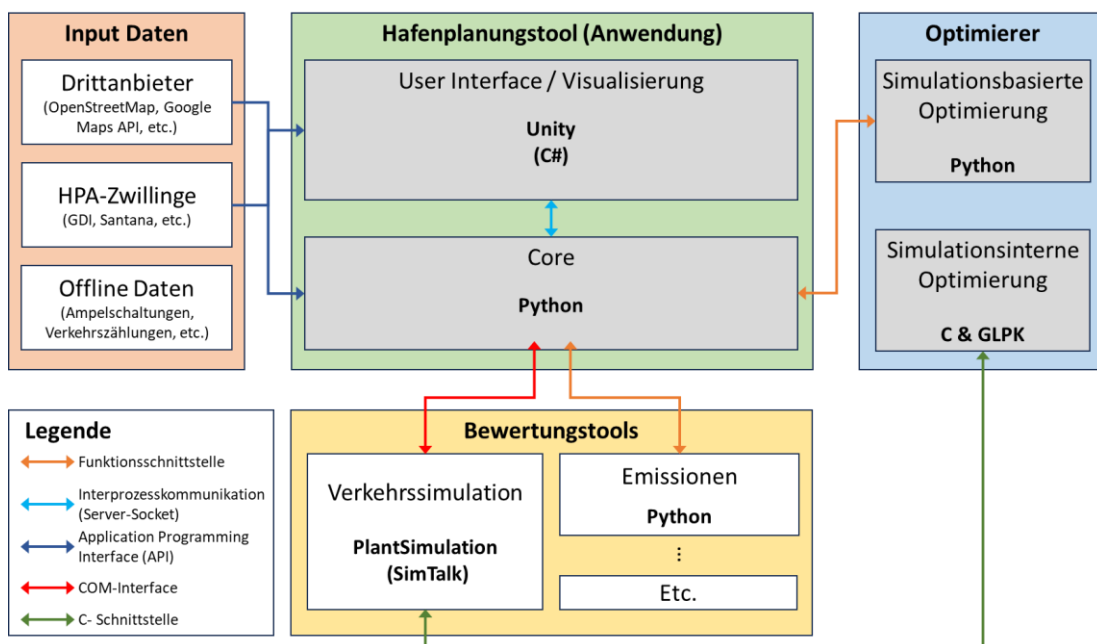


Abbildung 8: Darstellung der genutzten Anwendungen, Programmiersprachen sowie Schnittstellen

Einzelkomponenten des digitalen Hafenmasterplanungstools wurden so spezifiziert und implementiert, dass die Komponenten miteinander kommunizieren können.

Das User Interface und die Visualisierung wurden in Unity erstellt, welches die Programmiersprache C# verwendet. Ursprünglich war geplant, dass für das gesamte Hafenplanungstool Unity genutzt wird. Da jedoch keine geeignete Schnittstelle zwischen Unity und der Anwendung des Verkehrssimulationstools gefunden wurde, musste der Core in Python erstellt werden. Die Schnittstelle zwischen diesen beiden Teilmodulen ist als dauerhafte Server-Socket Verbindung konzipiert, welche zum Start der Anwendung aufgebaut wird. Die Input-Daten werden mithilfe einer API mit dem Planungstool verbunden. Dies stellt sicher, dass immer die aktuelle Version verfügbar ist. Die simulationsbasierte Optimierung ist wie auch der Core in Python geschrieben und kommuniziert daher mit dem Core

mithilfe einer Funktionsschnittstelle zwischen den Skripten. Ebenso funktioniert das Bewertungstool der Emissionen. Die Verkehrssimulation hingegen basiert auf der Anwendung Plant Simulation. Diese Anwendung hat mit SimTalk seine eigene objektorientierte und ereignisgesteuerte Programmiersprache. Daher musste eine Möglichkeit gefunden werden, zwischen Plant Simulation und Python zu kommunizieren. Die vielversprechendste von Plant Simulation unterstützte Schnittstelle ist eine COM-Schnittstelle. COM (Component Object Model) ist eine von Microsoft entwickelte Software-Schnittstelle, die es ermöglicht, verschiedene Software-Komponenten unabhängig von Programmiersprache oder Speicherort miteinander kommunizieren zu lassen. Durch diese Schnittstelle ist es dem Core eigenständig möglich die Anwendung zu öffnen und zu starten. Das bedeutet einerseits, dass Plant Simulation nicht über die gesamte Zeit im Hintergrund laufen muss, andererseits auch, dass die Anwendung häufiger gestartet werden kann, um verschiedene Simulationen zu starten. Beim Starten der Simulationssoftware ist es zudem möglich diese nur im Hintergrund zu starten, ohne dass sich ein Fenster öffnet. Dadurch wird das Nutzungserlebnis nicht durch das Öffnen des Tools gestört. Die simulationsinterne Optimierung ist in C geschrieben und wird von Plant Simulation direkt aufgerufen.

Im Grundsatz wird die gesamte Kommunikation zwischen den Modulen Hafenplanungstool, Bewertungstools und Optimierer durch Dateien im JSON-Format unterstützt. Diese Dateien enthalten einerseits alle Informationen, die für den Start der Simulation oder Optimierung nötig sind, andererseits die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen. Zur Verdeutlichung der Struktur der Input-Datei für die Simulation ist in der folgenden Abbildung ein exemplarischer Ausschnitt dargestellt.



### **4.2.3   Arbeitspaket 2.3: Entwicklung der Hafenmasterplan Simulation (Digitaler Zwilling)**

Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung der Hafenmasterplan Simulation. Da während der Systemkonzeption (4.1.2) festgelegt wurde, dass dieses Modul in Bewertungstools umbenannt wird, werden hier die implementierten Bewertungstools beschrieben.

#### **4.2.3.1   Verkehrssimulation**

Die Verkehrssimulation ist eins von mehreren Bewertungstools im Hafenmasterplanungstool. Sie ist jedoch ein zentraler Baustein in der Planung, da mit ihr viele verschiedene Szenarien und Layoutoptionen überprüft werden können. Das verwendete Simulationstool ist Plant Simulation, eine diskrete und ereignisbasierte Simulation. Das bedeutet, dass die Simulation die Zeit nutzt, um zu vordefinierten (statistisch oder zufällig) Zeitabständen Ereignisse auszulösen. Diese Ereignisse wiederum beeinflussen den nächsten Zustand des Systems.

Bezüglich des grundlegenden Konzepts der Verkehrssimulation gab es zwei Möglichkeiten. Eine Möglichkeit war, dass es ein Modell neben der Planungsanwendung gibt, welches immer auf dem neuesten Stand gehalten werden muss. Die andere ist, dass das Simulationsmodell standardmäßig leer ist und das Layout, sowie die Parametereinstellung jedes Mal neu aufgesetzt wird. Aufgrund des generischen Aufbaus sowie des Aufwands das Modell in der ersten Möglichkeit immer up-to-date zu halten, wurde entschieden, dass das Modell immer neu aufgesetzt wird.

Das Simulationstool besteht aus mehreren Modulen. Jedes dieser Module hat seinen eigenen Aufgabenbereich. Folgende Abbildung zeigt die von HPC implementierten Module:

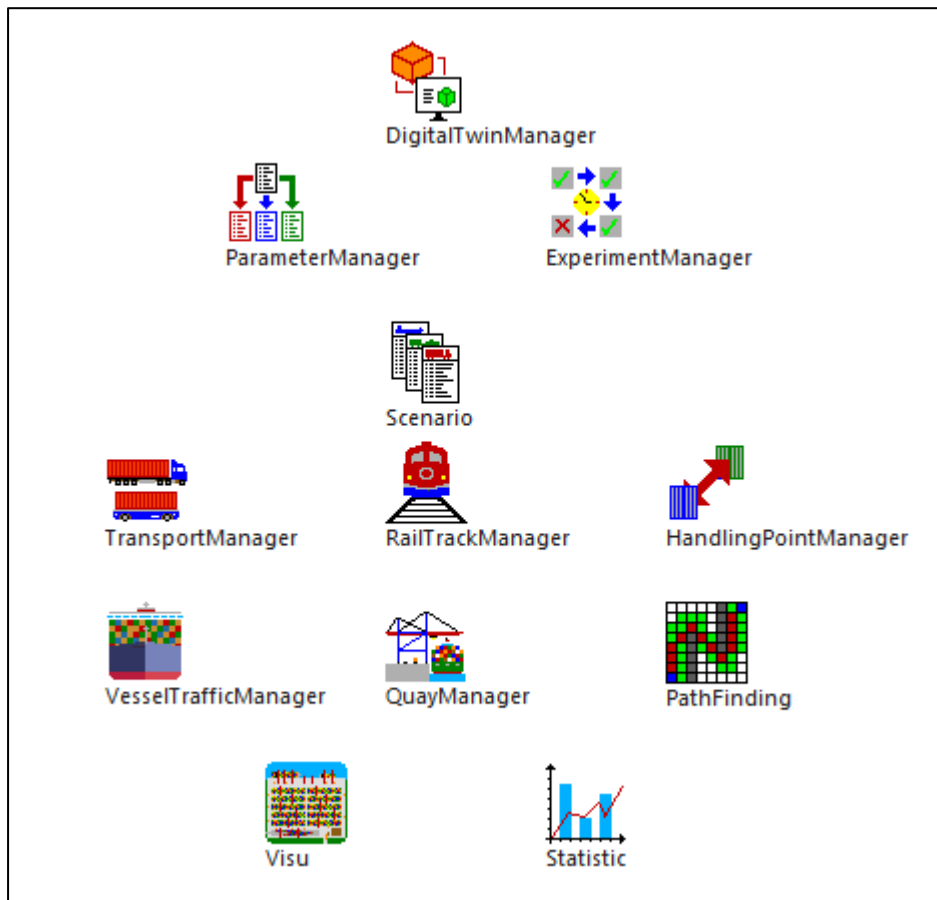


Abbildung 10 Module der Verkehrssimulation

Die Simulation ist so modelliert, dass nicht jeder Verkehrsträger abgebildet werden muss, sondern auch eine Betrachtung von nur einem Verkehrsträger geschehen kann. Das bedeutet, dass nicht jedes Modul für jede Simulation benötigt wird. Einige sind jedoch auch unersetzlich, wie z. B. der Digital Twin Manager oder das Scenario.

Während der Konzeption der Verkehrssimulation gab es einen starken Fokus darauf, dass das Simulationstool universell einsetzbar sein soll. Umgesetzt wurde dies durch die Funktion, dass die Simulation sich immer von null auf aufbaut. Das bedeutet, dass das Simulationsmodell, welches geöffnet wird, noch kein Layout besitzt und erst durch die Inputdateien gefüllt und aufgesetzt wird. Dies hat den Vorteil, dass niemand das Grundlayout im Simulationstool erstellen muss, damit es für die Hafenplanung nutzbar ist.

Im Folgenden werden die einzelnen Module und deren Aufgabe im Grundlegenden erläutert.

## Digital Twin Manager

Der Digital Twin Manager ist das Verbindungsmodul zu den Inputdateien sowie Ersteller der Exportdatei. Dieses Modul liest die Inputdatei und erstellt hieraus das Simulationsmodell. Hierbei kann zwischen zwei Grundfunktionen unterschieden werden:

- Erstellen des Layouts
- Einstellen der für die Simulation benötigten Parameter

### Erstellen des Layouts

Das Layout im Simulationstool wird, wie schon beschrieben, immer komplett neu aufgebaut. Dafür verantwortlich ist der Digital Twin Manager. Er liest die Daten ein, verarbeitet sie und setzt das Layout um. Jeder Verkehrsträger wird separat voneinander erstellt. Dazu kommen Quellen und Senken der einzelnen Verkehrsträger an den Systemgrenzen sowie auch die geplante Hafenanfläche.

Das Straßenverkehrslayout wird anhand von Daten von OpenStreetMap erstellt. Das Hafenanlagenstool zieht sich hierbei das Layout über eine API. Die folgende Abbildung zeigt den typischen Aufbau von Straßen innerhalb der Input-Datei:

```
{
  "type": "node",
  "id": 122408,
  "x": 564958.57882853178,
  "y": 5930385.9384044493,
},
{
  "type": "way",
  "id": 4309010018,
  "nodes": [
    1486131659,
    1486131661
  ],
  "tags": {
    "highway": "secondary",
    "lanes": "2",
    "layer": "1",
    "maxspeed": "50",
    "maxweight:signed": "no",
    "name": "Ellerholzbrücke",
    "oneway": "yes",
  }
},
{
  "type": "relation",
  "id": 1838615,
  "members": [
    {
      "type": "way",
      "ref": 28081315001,
      "role": "from"
    },
    {
      "type": "way",
      "ref": 136483045000,
      "role": "to"
    },
    {
      "type": "node",
      "ref": 10692044,
      "role": "via"
    }
  ],
  "tags": {
    "restriction": "only_straight_on",
    "type": "restriction"
  }
},
}
```

Abbildung 11: Typischer Aufbau von Straßen in OpenStreetMap

Es gibt drei verschiedene Typen, die für die Erstellung der Straßen im Simulationstool notwendig sind. Der erste sind die Knotenpunkte („Nodes“). Sie besitzen eine ID und Koordinaten. Der zweite Typ sind die Straßen („Ways“). Wie auch die Knotenpunkte besitzen sie eine ID. Zusätzlich dazu ist beschrieben, welche Knotenpunkte zu dieser Straße gehören. In diesem Fall sind es nur zwei

Knoten, es können aber auch mehr sein. Bei Kurven beispielsweise bildet die „gerade“ Verbindung zwischen mehreren Knoten die Biegung der Kurve. Zusätzlich dazu besitzt die Straße noch mehrere „Tags“. In diesen Tags sind verschiedene Eigenschaften der Straße definiert. Die beispielhaft gezeigte Straße trägt den Namen Ellerholzbrücke und ist vom Typ „Secondary“, was bedeutet, dass sie eine Landesstraße oder gut ausgebaute Kreisstraße ist. Sie ist eine Einbahnstraße mit zwei Spuren und einer maximal zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h. Der dritte Typ ist eine Relation. Die hier gezeigte Relation ist vom Typ Restriktion vom Typ „only\_straight\_on“. Das bedeutet, dass nur ein Geradeausfahren erlaubt ist. Wo diese Restriktion zu verorten ist, ist in den „Members“ zu sehen. Sie erklären von welcher Straße zu welcher Straße und über welchen Knoten diese Restriktion anzuwenden ist.

Da die Straßen in OpenStreetMap unterschiedlich lang sind, werden die einzelnen Straßenstücke schon in der Anwendung in Abschnitte mit maximal 20 Metern Länge unterteilt. Dafür werden die einzelnen Straßen zunächst aufgeteilt, sodass sie nur einen Start- und einen Endknoten besitzen und keine Zwischenknoten. Sollten die Teilabschnitte dann immer noch zu groß sein, werden neue Knoten interpoliert und die Straßen an diesen wieder aufgeteilt. Der Grund, warum dies schon in der Planungsanwendung passiert, ist der, dass die Benennung der Straßen dadurch konsistent bleibt und sowohl Planungstool als auch die Simulation dieselbe Basis besitzen. Zusätzlich werden die Koordinaten von Breiten- und Längengrad in ein Gauß-Krüger-Format umgerechnet.

In der Simulation müssen diese Informationen über das Layout verarbeitet werden. Da die OpenStreetMap-Daten nur einzelne Linien mit der Anzahl an Fahrspuren zeigen, muss dies im Simulationstool zunächst in einzelne Spuren übersetzt werden. Dies ist der Fall, da das Simulationsmodell sich auf der Ebene von einzelnen Spuren bewegt. Hier musste darauf aufgepasst werden, dass nicht bei jeder Straße eine Aussage vorhanden ist, wie viele Spuren sie in welche Richtung besitzt. In diesem Fall gibt es einen Standardanzahl an Spuren, welche sich an dem Straßentyp orientiert. Anschließend müssen die richtigen Spuren in der Simulation miteinander verknüpft werden. Bei einfachen einspurigen Straßen ist dies trivial, da die Straßen, die den gleichen Knotenpunkt besitzen, einfach verbunden werden. Ist dieser Knotenpunkt jedoch eine Kreuzung wird dies etwas schwieriger, da beispielsweise nur die Rechtsabbieger mit der Straße nach rechts verbunden werden dürfen. Zusätzlich gibt es auch noch Relationen, die bestimmte Verbindungen verbieten oder ausschließlich diese erlauben. Hierbei ist hervorzuheben, dass dies alles automatisch geschehen muss. Wenn alle Straßen vorhanden sind, müssen noch die Quellen und Senken implementiert werden, so wie auch das Hafenareal. Dieses wird als Black-Box konzipiert. Näheres hierzu ist in der Beschreibung des Handling Point Manager zu entnehmen.

Nachdem die Straßen für das Layout erzeugt wurden, müssen diese noch Verkehrsregeln erhalten. Einige stehen in den Eigenschaften der Straßen, Dazu gehört die Maximale Höchstgeschwindigkeit und ob bestimmte Fahrzeugtypen auf dieser Straße verboten sind. Bei der Höchstgeschwindigkeit ist es ähnlich wie die Anzahl der Spuren: Bei einigen Straßen gibt es keinen Eintrag. In diesem Fall gilt wieder ein Standard anhand des Straßentyps. Hinsichtlich der Vorfahrtsregeln gibt es einen eigenen Unterpunkt in der Input-Datei. Es gibt zwar offiziell eine Eigenschaft in OpenStreetMap, welche „Vorfahrt gewähren“ definiert, diese wird jedoch nicht universell genutzt und ist daher nicht zu gebrauchen. In der Simulation wurde es so eingebaut, dass nur „Vorfahrt gewähren“ eingetragen muss, mit dem Zusatz, ob zu stoppen ist. Sobald kein Eintrag an einer Kreuzung vorhanden ist, gilt Vorfahrt Rechts-Vor-Links. Was in der Realität leicht erscheint, ist nicht so leicht automatisch zu erstellen. Es muss herausgefunden werden, auf welche Straßen geachtet werden muss. Neben den Vorfahrtsstraßen mussten auch Kreuzungen mit LSA implementiert werden. Während die Ampelphasen schnell eingebaut waren, stellte sich in der Entwicklung ein weiteres Problem: Sobald die Ampel grün wurde, sind die Fahrzeuge losgefahren, ohne zu schauen, ob sie aufgrund einer Stausituation im Kreuzungsbereich stehenbleiben müssen. Um dies zu umgehen, musste eine Logik erstellt werden, welche den Kreuzungsbereich automatisch erkennt. Die Herausforderung hier war, dass eine Kreuzung nicht unbedingt nur aus einem Knotenpunkt besteht.

Nachdem das Straßenverkehrslayout erstellt wurde, wird das Schienennetz erstellt. Dieses ist in der aktuellen Version noch simpel gehalten. Es gibt keine genauer definierten Weichen, an denen rangiert werden kann, sondern nur einzelne Streckenelemente, sowie die Quellen, Senken und Anschlüsse ans Hafenareal. Der Aufbau der einzelnen Schienenabschnitte ist daher auch etwas anders. Folgende Abbildung zeigt einen typischen Aufbau für das Schienennetzwerk:

```

"ID": "HpcTrack",
"Type": "Railway",
"RouteWeightFactor": 1,
"Shape": "LINE",
"Start": {
  "X": 564280.42,
  "Y": 5930249.78,
  "Z": 0
},
"End": {
  "X": 564294.42,
  "Y": 5930297.78,
  "Z": 0
},
"Predecessors": {
  "1": {
    "ID": "HpcTrack111"
  }
},
"Successors": {
  "1": {
    "ID": "HpcTrack1"
  }
}
}

"ID": "HpcTrack111",
"Type": "Railway",
"RouteWeightFactor": 1,
"Shape": "CURVE",
"StartAngle": 16.000000000000002,
"Radius": 339.99241348801115,
"Start": {
  "X": 564070.42,
  "Y": 5930133.28,
  "Z": 0
},
"End": {
  "X": 564280.69000000001,
  "Y": 5930249.84,
  "Z": 0
},
"Predecessors": {
  "1": {
    "ID": "HpcTrack1023"
  }
},
"Successors": {
  "1": {
    "ID": "HpcTrack"
  }
}
}

```

Abbildung 12: Typischer Aufbau für das Schienennetzwerk

Der linke Input zeigt einen geraden Schienenabschnitt. Dies ist am Shape „LINE“ zu sehen. Zusätzlich gibt es die Eigenschaften der Start- und Endkoordinate. Um zu definieren, welche Schienenabschnitte miteinander verknüpft werden, gibt es eine Anzahl an Vorgängern als auch Nachfolgern. Die Rechte Seite der Abbildung zeigt eine Kurve. Sie besitzt zusätzlich zu den Eigenschaften der geraden Abschnitte noch einen Startwinkel sowie einen Radius. Durch diese Informationen kann der Kreisabschnitt der Kurve exakt definiert werden.

Das dritte Teilnetzwerk, welches erzeugt werden muss, ist das Wasserwegenetzwerk für die Schiffe. Hier gibt es ein ähnliches Konzept wie bei den Schienen. Innerhalb des Simulationstools wurden die Wasserwege jedoch als zweispurige Wege erzeugt. Dies hat den Vorteil, dass in der Wegfindung definiert werden kann, wo sich Schiffe auf den Wasserwegen begegnen dürfen. Zusätzlich haben die Wasserwege auch mehrere Eigenschaften, wie die maximale Geschwindigkeit, einen maximalen Tiefgang, eine maximale Höhe sowie eine maximale Breite der Schiffe. Zusätzlich zu den Wasserwegen gibt es jedoch noch einige andere Elemente, die benötigt werden, um das Wasserwegenetzwerk zu erstellen. Dazu gehören die Liegeplätze, die Wendebecken, die Reede (sicherer Ankerplatz vor dem Hafen, wo gewartet werden kann) sowie die Quelle und Senke. Für alle ist der Aufbau derselbe, wie für die Wasserwege.

Anschließend müssen noch Elemente erzeugt werden, bei denen zwei oder mehr Verkehrsträger interagieren müssen. Dazu gehört zum einen ein Bahnübergang zum anderen Klapp-/Hubbrücken. Sie werden ebenfalls über die Input-Datei mit Daten gefüllt. Die genaue Funktion dieser Elemente ist in den Modulen Transport Manager sowie im Vessel Traffic Manager erklärt.

### Einstellen der Parameter

Nach Erstellen des Layouts müssen die Parameter eingestellt werden. Dazu gehören beispielsweise die Verkehrszählpunkte, die es im Netzwerk gibt. Diese haben eine doppelte Funktion. Einerseits kann ihnen eine initiale Verkehrszählung hinzugefügt werden, welche den bisherigen Verkehr abbilden kann, andererseits werden mit ihnen die tatsächlichen Verkehre in der Simulation gezählt. Weiterhin müssen auch die genauen Simulationszeiten hinterlegt werden. Also welcher Zeitraum simuliert werden soll, welche Zeitpunkte statistisch relevant sind, wann die Verkehrsbewegungen für die Visualisierung in Planungsanwendung festgehalten werden sollen. Ebenso kann eingestellt werden, dass nur bestimmte Verkehrsträger simuliert werden sollen.

### **Parameter Manager**

Der Parameter Manager verwaltet alle im Modell vorhandenen Parameter, sowie sogenannte Parameter-Tabellen. Er stellt sicher, dass zu Beginn der Simulation der jeweilige Parameter in jedem Modul denselben Wert besitzt. Die Parameter-Tabellen sind, wie der Name schon sagt, Tabellen, die mehrere Parameter konsolidieren. Diese Parameter haben je nach Spezifikation unterschiedliche Werte.

### **Experiment Manager**

Der Experiment Manager verwaltet den Simulationslauf und ist für den Umgang mit Fehlern zuständig. Falls es in der Simulation zu einem Fehler kommt, wird die Fehlermeldung festgehalten. Fehler werden anschließend in einem Fehlerprotokoll in die Rückgabedatei geschrieben und an das Planungstool zurückgegeben.

Es wird zwischen kritischen und unkritischen Fehlern unterschieden. Ein kritischer Fehler ist, wenn das Simulationsmodell aufgrund von falschen Eingaben oder internen Modellierungsfehlern keine Ergebnisse erzeugen kann. In diesem Fall wird das Fehlerprotokoll direkt gefüllt und zurückgeschickt. Bei einem unkritischen Fehler hingegen wird zwar das Fehlerprotokoll befüllt, das Modell läuft jedoch trotzdem weiter und schickt die Fehler nach beenden des Laufes mit den Ergebnissen zurück. Beispiele für unkritische Fehler sind Eingaben, die einen Schwellenwert zwar nicht überschreiten, jedoch eher falsch als richtig sind.

## Scenario

Im Scenario wird aus den Eingabeparametern ein Verkehrsszenario erstellt. Zunächst muss für alle Verkehrsträger ein Fahrplan erstellt werden, in dem alle möglichen Quelle-Senke-Beziehungen mit Zahlen gefüllt werden. Dabei wird bei allen drei Verkehrsträgern zwischen Bestandsverkehr und zusätzlichem Verkehr unterschieden.

### Bestandsverkehr

Der Bestandsverkehr für den Straßenverkehr wird anhand der Verkehrszählungen erstellt. Hierfür wird die in Kapitel 4.2.1 beschriebene simulationsinterne Optimierung genutzt. Damit der Optimierer aus den Verkehrszählungen einen Fahrplan für alle Fahrzeuge erzeugt, braucht er zusätzlich zu den Verkehrszählungen noch Informationen, wie diese Verkehrszählungspunkte zusammenhängen. Dafür wird eine Matrix erstellt, welche für alle möglichen Quelle-Senke-Beziehungen angibt, ob der Verkehrszählungspunkt auf der möglichen Route liegt oder nicht. Daraus erstellt der Optimierer dann für jeden Fahrzeugtyp und jede Stunde die Menge an Fahrzeuge, die die Quelle-Senke-Beziehungen nutzen. Diese Ergebnisse werden dann in einen Fahrplan je Fahrzeugtyp und Quelle-Senke-Beziehung zusammengefasst.

Durch die deutlich geringere Anzahl an Schiffen wird der Bestandverkehr der Schiffe deutlich einfacher berechnet. Hierfür muss ein Schiffsfahrplan hinterlegt werden. Dieser kann entweder wöchentlich sein oder nur eine Ankunft je angegebenen Schiff enthalten. Der Vorteil der spezifischen Schiffe ist, dass einfach eine vergangene Segelliste in das Tool eingespielt werden kann.

Die Erstellung des Bestandsverkehrs für Züge ist funktionsgleich zu der Berechnung der Schiffe.

### Zusatzverkehr

Zusatzverkehr beschreibt die Anzahl an zusätzlichem Verkehr, der durch die Planung des Hafenareals entsteht. Hier muss zwischen einem neuen und einem bestehenden Hafenareal unterschieden werden.

Bei einem neuen Hafenareal kann die Berechnung des zusätzlichen Verkehrs in zwei verschiedenen Varianten geschehen. Die erste ist, dass schon eine Berechnung des täglichen Verkehrs durch vorherige Planungen vorhanden ist. Diese Zahlen werden dann im nächsten Schritt übernommen. Da die Zahlen auf Tages- bzw. Wochenbasis zu erwarten sind, müssen die Verkehre noch weiter runtergebrochen werden. Beim Straßenverkehr geschieht dies mithilfe einer Ankunftsverteilung, die hinterlegt werden muss. Schienen- und Schiffsverkehr

hingegen wird so verteilt, dass er auf dem Hafenareal Platz findet. Die zweite Variante ist, dass der Zusatzverkehr anhand von Umschlagsmengen berechnet wird. Hierfür muss angegeben werden wie viel von welchem Gut auf dem Hafenareal umgeschlagen wird. Dies können auch beliebig viele verschiedene Güter sein. Anschließend muss für jedes Gut hinterlegt werden, welche Modal-Split es besitzt. Das bedeutet, welcher Anteil des Gutes mit dem Lkw, der Bahn oder dem Schiff transportiert wird. Es ist auch möglich, dass das Areal ein Gut verbrauchen oder produzieren kann. Anschließend muss definiert werden, welche Fahrzeug-/Bahn/Schiffstypen zu welchem Anteil genutzt werden und welche Menge des Gutes sie transportieren können. Aus diesen Zahlen werden dann die Gesamtmengen an Transportbewegungen definiert. Anschließend werden diese Zahlen in der gleichen Weise heruntergebrochen, wie wenn eine Anzahl der Bewegungen schon bekannt ist.

Das Problem bei einem bestehenden Areal ist, dass dort schon Verkehr angefallen ist, welcher sich im Bestandsverkehr verlieren kann. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten der Berechnung. Entweder bleibt der bestehende Verkehr und es wird nur der zusätzliche Verkehr durch zusätzliche Mengen addiert, oder es muss der Gesamtverkehr von dem bestehenden Hafenareal berechnet werden, vom Bestandsverkehr abgezogen und anschließend die Verkehrsmenge der neuen Planung des Areals genutzt werden.

Wenn die Fahrpläne für alle Verkehrsträger abgeschlossen sind, wird eine Tabelle erzeugt, in der jedes einzelne Fahrzeug mit exakter Ankunftszeit, sowie Abmessung und Ladung einzeln abgebildet ist. Da beim Straßenverkehr kein genauer Zeitpunkt hinterlegt ist, sondern nur eine bestimmte Stunde in der ein Verkehr stattfindet, wird hier zufällig ein Zeitpunkt in dieser Stunde gewählt, sodass bei mehreren Läufen eine unterschiedliche Verteilung der Fahrzeuge und dadurch auch andere Ergebnisse zustande kommen kann. Dadurch lassen sich auch statistische Ausreißer entdecken. Anhand der Fahrzeug-Liste erzeugt die Simulation die Fahrzeuge zum gegebenen Zeitpunkt, sodass diese ihre vorgegebene Route durchlaufen können, bevor sie nach Beenden der Route wieder gelöscht werden.

### **Transport Manager**

Der Transport Manager ist für die Abläufe der Straßenfahrzeuge zuständig. Die Simulation ist so aufgesetzt, dass der User beliebig viele unterschiedliche Fahrzeugtypen in seinem Simulationslauf implementieren kann. Im Prototyp sind aktuell jedoch nur zwei Typen hinterlegt: der Personenkraftwagen (Pkw) und der Lastkraftwagen (Lkw). Für diese Fahrzeuge werden im Transport Manager die genauen Routen (Spur, Überholmanöver) ermittelt. Die Routenfindung basiert auf einem internen Algorithmus der Simulationssoftware, der die kostengünstigste

Route auswählt. Jede Straße besitzt ein Gewichtungsattribut, mit welcher die Länge des Straßenstücks multipliziert wird. Daraus ergeben sich dann die Kosten für dieses Straßenstück. Das Gewichtungsattribut ist dabei von der prozentualen Belegung des Straßenstücks abhängig. Das bedeutet, dass ein Fahrzeug eher eine etwas längere Strecke einer vollen Strecke vorziehen würde. Weiterhin gibt es für jeden Fahrzeugtyp ein anderes Gewichtungsattribut. Dies hat den Vorteil, dass bestimmte Strecken für Lkw gesperrt oder sehr unbeliebt gemacht werden können, wohingegen Pkw dort normal entlangfahren können.

Ein weiteres wichtiges Element in diesem Modul ist das Fahrzeugverhalten. Hier wurde im Wesentlichen auf zwei Dinge geachtet: Die Fahrzeuge sollen den richtigen Abstand zum vorderen Fahrzeug besitzen und fahren im Ziehharmonika-Effekt los.

Zusätzlich dazu ist der Transport Manager für die Schaltung der LSA an Kreuzungen und Bahnübergängen zuständig. Die Bahnübergänge sind so konzipiert, dass die Schranken dann schließen, wenn ein Zug einen bestimmten Sensor überfährt, und wieder öffnen, wenn der Sensor auf der anderen Seite der Straße vom letzten Waggon ausgelöst wird. Der Bereich des Bahnübergangs wird hierbei genauso konzipiert wie die Kreuzungsbereiche: Niemand darf in diesen Bereich fahren, wenn er im Bereich stehen bleiben müsste. Ein besonderer Fall ist, wenn sich Kreuzung und Bahnübergang eine LSA teilen. Hierbei ist die Logik so, dass der Bahnübergang das größere Gewicht besitzt und die reguläre Schaltung der LSA für den Zeitpunkt der Bahnquerung außer Kraft und jede Ampel auf rot setzt. Zu guter Letzt ist der Transport Manager auch für die Einhaltung sonstiger Verkehrsregeln wie Vorfahrt und Geschwindigkeitsbegrenzung zuständig.

### **Vessel Traffic Manager**

Dieser Manager ist für den Schiffsverkehr verantwortlich. Im Gegensatz zum Straßenverkehr, wo das Fahrzeug einfach sein Zielpunkt erhält, haben die Schiffe eine bestimmte Prozessreihenfolge, die sie einhalten müssen. Folgende Tabelle zeigt eine mögliche Prozessreihenfolge:

Tabelle 3: Beispielhafte Prozessreihenfolge für den Schiffsverkehr

Ort	Prozess	Ø Prozesszeit	Min Prozesszeit	Max Prozesszeit	Richtung
Ankunftstonne					Ankunft
Reede	Check ob Weiterfahrt möglich				Ankunft
Schlepper Ankunft	Schlepper festmachen	0	0	0	Ankunft
Wendebecken Ankunft	Schiff wenden	15:00.0000	10:00.0000	20:00.0000	Ankunft
Liegeplatz	Schiff anlegen	15:00.0000	10:00.0000	20:00.0000	Ankunft
Liegeplatz	Schlepper lösen	0	0	0	Ankunft
Liegeplatz	Schiffsbearbeitung	2:00:00:00.0000	1:12:00:00.0000	2:12:00:00.0000	
Liegeplatz	Check ob Weiterfahrt möglich				Abfahrt
Liegeplatz	Schlepper festmachen	0	0	0	Abfahrt
Liegeplatz	Schiff ablegen	15:00.0000	10:00.0000	20:00.0000	Abfahrt
Schlepper Abfahrt	Schlepper lösen	0	0	0	Abfahrt
Abfahrtstonne					Abfahrt

Die hier gezeigte Prozessreihenfolge läuft so ab, dass das Schiff im System an der Ankunftstonne ankommt. Dort wird dann eine Route zum nächsten Point of Interest (POI) gesucht. POIs sind so definiert, dass das Schiff dort warten kann, falls die weitere Route noch nicht befahrbar ist. Nicht jeder Ort, der in dieser Prozessreihenfolge abgebildet ist, ist ein POI. Der Prozess „Check ob Weiterfahrt möglich“ definiert hierbei einen POI. In diesem Fall ist die Reede der nächste POI. Es wird eine Route gesucht (der Ablauf der Routenfindung ist im Modul Path Finding erklärt) und sobald eine Route gefunden wird, fährt das Schiff in Richtung der Reede. Von dort wird eine Route gesucht, welche alle Orte bis zum nächsten POI beinhaltet. Wenn die Orte dann erreicht werden, wird der Prozess ausgelöst. In diesem Fall ist der nächste Prozess das Festmachen der Schlepper. Für bestimmte Prozesse gibt es unterschiedliche hinterlegte Prozesszeiten. Dabei nutzt die Simulation einen Zufallswert aus der Dreiecksverteilung der minimalen, maximalen und durchschnittlichen Prozesszeit. Diese haben zwar einen Standardwert, welcher in der Simulation hinterlegt ist, können aber vom User selbst in der Input-Datei festgelegt werden. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Schlepper während der Fahrt festgemacht werden und das Schiff dafür nicht stehenbleiben muss. Als nächstes muss das Schiff in einem definierten Wendebecken drehen und Rückwärts in Richtung Liegeplatz fahren. Am Liegeplatz wird zunächst angelegt, bevor die Schlepper dann wieder vom Schiff gelöst werden. Anschließend beginnt die Bearbeitung des Schiffes (Be- und Entladung). Sobald die Bearbeitung abgeschlossen ist, wird wieder geprüft, ob eine Weiterfahrt möglich ist. Anschließend werden Schlepper festgemacht, das

Schiff legt ab, fährt bis zum Punkt wo die Schlepper gelöst werden und verschwindet anschließend an der Abfahrtstonne aus dem System.

Eine andere Prozessreihenfolge wäre, wenn das Schiff nicht vor der Bearbeitung sondern nach der Bearbeitung wendet. Es kann auch sein, dass es zwei Orte gibt, an denen Schlepper festgemacht werden müssen. Dies ist häufiger bei sehr großen Schiffen und schlechten Wetterverhältnissen der Fall.

Zusätzlich stellt der Vessel Traffic Manager sicher, dass die vorgegebenen Regeln auf den verschiedenen Wasserwegen einhalten werden. Hierzu hat er die Unterstützung des „Path Finding“ sowie des „Quay Manager“, welche in ihrer jeweiligen Funktion dafür sorgen, dass bei der Abwicklung des Schiffsverkehrs der richtige Liegeplatz angefahren sowie Begegnungsregeln eingehalten werden.

### **Path Finding**

Im Gegensatz zum Routing des Straßenverkehrs ist das Routing der Schiffe etwas komplexer. Daher wird nicht der softwareinterne Routenfindungsalgorithmus genutzt, sondern ein eigener Dijkstra-Algorithmus. Dieser wurde gewählt, da es zu viele Einschränkungen in der Routenfindung gibt, als dass es der interne Algorithmus abbilden kann. Der Wegfindungsalgorithmus ist im Path Finding Modul zu finden. Der Algorithmus baut die Route nach und nach auf und bewertet die einzelnen Teilstücke nach mehreren Kriterien. Dabei müssen alle Zwischenziele, an denen bestimmte Prozesse gestartet werden, in der Route vorhanden sein. Folgende Kriterien sind im Wegfindungsalgorithmus hinterlegt:

- Fahrtzeit
- Mögliche Begegnung mit anderen Schiffen
- Tiefgang und Höhe der Schiffe
- Wetterverhältnisse
- Klappbrücken

Die Fahrtzeit ist ein simples Kriterium, durch welches die kürzeste Route ausgewählt wird. Die mögliche Begegnung mit anderen Schiffen ist hingegen ein Ausschlusskriterium. Da die Schiffe beim Finden einer Route die Teilstücke für die Zeit des Passierens reservieren, ist es natürlich nicht möglich, dass zu diesem Zeitpunkt ein anderes Schiff in die gleiche Richtung fährt. Die Begegnung mit einem anderen Schiff in entgegengesetzter Richtung ist jedoch auch nicht außer Acht zu lassen, da die Breite von Schiffen an manchen Orten einen bestimmten Wert nicht überschreiten darf. Durch den Aufbau der Wasserwege als zweispurige Wege mit je einer Spur je Richtung, ist die Verknüpfung zwischen beiden Richtungen sehr einfach. Wenn in der anderen Richtung ein Schiff fährt, welches

die addierte Breite überschreiten würde, ist dieser Wasserweg zu diesem Zeitpunkt nicht passierbar. Ein anderes Ausschlusskriterium ist der Tiefgang und die Höhe der Schiffe. Speziell wenn der Hafen tideabhängig ist, wie der Hamburger Hafen es ist, muss geschaut werden, ob das Schiff mit einem bestimmten Tiefgang zu diesem Zeitpunkt dort entlangfahren darf oder mit einer bestimmten Höhe unter einer Brücke passieren darf. Ähnlich verhält es sich mit den Wetterverhältnissen. Ein weiteres Kriterium sind vorhandene Klappbrücken. Diese haben bestimmte Öffnungs- und Schließzeiten in denen größere Schiffe passieren können. Wenn aufgrund der Ausschlusskriterien keine Route findet, muss es warten und sucht nach einer bestimmten Wartezeit erneut.

### **Quay Manager**

Der Quay Manager verwaltet die Liegeplätze. Hier wird überprüft, ob Liegeplätze verfügbar sind und falls dies nicht der Fall ist, wird geschaut, wie lange diese noch belegt sind. Ebenso wird überprüft, ob für ein einfahrendes Schiff noch Platz am Liegeplatz wäre, trotz dessen, dass schon ein Schiff anliegt. Gleichzeitig ist er für das An- und Ablegen der Schiffe am Liegeplatz verantwortlich.

### **Rail Track Manager**

Der Rail Track Manager ist das Pendant des Transport Managers für den Zugverkehr. Hier werden die Züge erzeugt und die Route berechnet. Für die Routenberechnung wurde der softwareinterne Wegfindungsalgorithmus genutzt. Da Züge auf derselben Strecke sowohl in die eine als auch in die andere Richtung fahren können, muss jedoch sichergestellt werden, dass sich nicht zwei Züge auf der Strecke begegnen. Aufgrund des sehr kleinen implementierten Layouts wird daher zunächst die gesamte Strecke geblockt. Bei einer Weiterentwicklung des Zugverkehrs ist denkbar, dass ein ähnlicher Algorithmus wie der der Schiffe genutzt wird. Aufgrund des sehr einfachen Aufbaus der Züge ist ebenfalls auch noch kein Rangieren implementiert.

### **Handling Point Manager**

Da bei einer Hafenmasterplanung meist erst geplant wird, wie einzelne Hafensflächen aussehen und genutzt werden könnten, wurde im Projekt entschieden, dass diese Flächen als Black Box mit bestimmten Parametereinstellungen dargestellt werden. Dies hat den Vorteil, dass nur eine grobe Vorstellung der Nutzung der Hafensfläche vorhanden sein muss, um eine Simulation durchführen zu können. Denn häufig gibt es noch keine explizite Planung des Layouts und den dazugehörigen Prozessen. Mit Hilfe der Parameter kann die Fläche jedoch so eingestellt werden, dass es keine über- bzw. Unterdimensionierung der Fläche gibt. Beispiel für die an die Simulation mitgegebene Parameter sind die Kapazitäten im Lager (je Güterart),

Pufferparkplätze vor der Bearbeitung der Fahrzeuge, die Abfertigungskapazität als auch die Dauer der Abfertigung je nach Verkehrsträger. Ebenso kann im Handling Point auch ein Verbrauch von Gütern bzw. eine Produktion eingestellt werden, falls sich ein produzierendes Gewerbe dort ansiedeln soll. Folgende Abbildung zeigt den simulationsinternen Aufbau der Black Box.



Abbildung 13: Aufbau der Black Box für Hafenaerale

In der Black Box wird zwischen den drei Verkehrsträgern unterschieden. Alle drei sind im Grundsatz gleich mit jeweiligen Spezifikationen der jeweiligen Verkehrsträger. Es gibt immer ein Interface für die Einfahrt und Ausfahrt. Anschließend gibt es einen Buffer für die Fahrzeuge, die nicht abgefertigt werden können. Darauf folgend ist die Abfertigung. Nach der Abfertigung des Fahrzeugs gibt es einen „Buffer“. Dieser ist nötig, falls es einen Rückstau aus dem Verkehrsnetz gibt. So kann sichergestellt werden, dass die Fahrzeuge weiter abgefertigt werden können. Nach dem Buffer fahren die Fahrzeuge wieder in das Verkehrsnetz. Die Besonderheit beim Straßenverkehr ist, dass es eine Quelle und Senke gibt. Diese ist beispielsweise für Mitarbeiter. Wenn dieser ankommt, wird er nicht abgefertigt, sondern fährt in die Senke. Sobald seine Schicht vorbei ist, wird dann ein neues Fahrzeug in der Quelle erzeugt, welches dann wieder ins Verkehrsnetz fährt. Die Schiene hat die Besonderheit, dass Züge sowohl vorwärts als auch rückwärts einfahren können. Da der Zug im Modell aus einem Lokomotiven-Objekt mit mehreren Waggon-Objekten besteht, das Bearbeitungsobjekt jedoch nur ein Objekt beinhalten kann, müssen die Waggon für die Zeit der Bearbeitung gelöscht werden. Wenn der Zug fertig ist, wird die Lokomotive wieder auf das Gleis gestellt und Waggon hinzugefügt. Sollte das Gleis voll sein, oder keine Route gefunden werden, wartet die Lokomotive im

Waiting Buffer, bis sie losfahren kann. Schiffe können auch implizit abgebildet werden. Hier ist der Grundprozess derselbe wie auch beim Straßenverkehr. Aus Gründen der visuellen Darstellung, wurde jedoch entschieden, dass die Liegeplätze explizit dargestellt werden.

### **Statistic**

In dem Modul Statistic werden alle für die Ergebnisse relevanten Daten gesammelt. Es lässt sich in den Inputdaten einstellen, welche Daten erfasst werden sollen und in welchem Zeitraum. Anhand dessen lassen sich am Ende der Simulation Schlüsselkennzahlen ermitteln, welche im Anschluss in die Ergebnisdatei geschrieben werden.

Ein wichtiger Aspekt in diesem Modul ist das Mitschreiben der Fahrzeugbewegungen. Es wurde sich dafür entschieden die Bewegungen ereignisbasiert festzuhalten und nicht zeitbasiert. Dies hat den Vorteil, dass weniger Daten mitgeschrieben werden müssen. Beispiele für diese Ereignisse sind das Verlassen und Befahren eines Streckensegments. Dies ist für alle Verkehrsträger gleich. Entsprechend der Art des jeweiligen Prozesses haben die Verkehrsträger noch andere Statusmeldungen. All diese Statusmeldungen werden für den angegebenen Zeitraum dokumentiert. Ein weiterer wichtiger Punkt sind die Emissionen der einzelnen Verkehrsträger. Hierfür werden die eben erwähnten Statusmeldungen genutzt. Durch die vom Nutzer angegebenen Emissionsparameter der jeweiligen Verkehrsträger werden die Emissionen berechnet.

Um die dargestellten Verkehrsbewegungen im Straßenverkehr quantitativ zu bewerten, werden Daten für eine Heatmap der einzelnen Straßensegmente gesammelt. Ebenso wird die Wartezeit an LSA berechnet. Hierfür werden zunächst während der Simulation die Zeitpunkte, an denen die einzelnen Fahrzeuge die Verkehrszählungspunkte passieren, in einem Log festgehalten. Anschließend werden die Daten für jede Strecke zwischen den Zählpunkten zusammengeführt und ausgerechnet, wie lange die Strecke normalerweise benötigt. Dadurch kann berechnet werden, wie viel länger die Fahrzeuge im Schnitt gebraucht haben. Dies ist dann die verlorene Zeit durch Staus und Ampeln. Durch diese Wartezeit kann die Verkehrsqualität der LSA bewertet werden. Ebenso ist sie die Grundlage für die simulationsbasierte Optimierung der LSA.

Zusätzlich hierzu werden in diesem Modul die Logs für die Ampelschaltungen gesammelt. Diese werden für die Visualisierung des Straßenverkehrs benötigt, da das Stehenbleiben und Fahren von Fahrzeugen an Ampeln mit der angezeigten Ampelphase übereinstimmen müssen.

## Visu

Das Visu-Modul ist nicht mit der Visualisierung des Hafenplanungstool zu verwechseln. Sie ist eine simulationsinterne Darstellung des Layouts, welches durch den Digital Twin Manager erzeugt wurde. In der Visu können innerhalb der Simulation die Fahrten der einzelnen Fahrzeuge verfolgt werden. Sie ist elementar wichtig, da in ihr alle Fahrzeuge fahren und dadurch nahezu alle Ereignisse ausgelöst werden. Die Visualisierung der Fahrzeugbewegungen in der Nutzeroberfläche wird durch die Bewegungen in der Visu erstellt. Dafür werden die Bewegungen der einzelnen Fahrzeuge überwacht und in die Ergebnisdatei geschrieben, welche wiederum die Nutzeroberfläche aufruft, um die Bewegungen darzustellen.

### 4.2.3.2 Emissionsberechnung

Zusätzlich zu der Verkehrssimulation gibt es noch ein weiteres von HPC entwickeltes Bewertungstool: Die Emissionsberechnung. Diese wurde als Python-Skript geschrieben und bewertet die Bewegungsdaten einer vorher gelaufenen Simulation. Die Berechnung dieses Tools ist aktuell identisch mit der Berechnung innerhalb des Simulationstools. Die Emissionsberechnung als weiteres Bewertungstool hat jedoch den Vorteil, dass sich bei Anpassung der Input-Parameter der Emissionen auch später noch Anpassungen, wie ein geringerer Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge, bewerten lassen, ohne dass ein neuer Simulationslauf gestartet werden muss.

### **4.2.4   Arbeitspaket 2.4: Entwicklung der Hafenmasterplan 3D Visualisierung**

Ziel dieses Arbeitspakets war eine dreidimensionale Visualisierung des Planungstools. Dazu gehört die Möglichkeit der visuellen Darstellung des bestehenden Hafens und der Planung des Hafenareals, sowie auch die dreidimensionale Visualisierung der Verkehrssimulation. HCI war hierbei für dieses Arbeitspaket verantwortlich. HPCs Beitrag in diesem Arbeitspaket war das Bereitstellen der anzuzeigenden Ergebnisse. Hierzu wurde in Abstimmung mit dem HCI das Exportformat für die Bewegungsdaten von Fahrzeugen konzipiert und in die Funktion in die Simulation implementiert. Die folgende Abbildung zeigt einen Screenshot der Fahrzeugvisualisierung.



Abbildung 14: 3D-Darstellung der Fahrzeugbewegungen

Eine umfassende Darstellung des Vorgehens und der Ergebnisse dieses Arbeitspaketes ist im Verbundabschlussbericht zu finden.

#### **4.2.5 Arbeitspaket 2.5: Entwicklung der Hafenmasterplan User Interface & Reports**

Ziel dieses Arbeitspakets war es ein User Interface auf einem Touchtisch zu entwickeln, mit dem der User mithilfe der dreidimensionalen Visualisierung eine Fläche beplanen kann, sowie auch die Ergebnisse seiner Planung begutachten und bewerten kann. Wie auch schon im vorigen Arbeitspaket war HCI federführend in diesem Arbeitspaket. Ähnlich wie für die 3D Visualisierung haben HCI und HPC das Format der bereitzustellenden Daten konzipiert, welches dann in den jeweiligen Tools umgesetzt wurde. Ein Beispiel hierfür ist die Anzeige einer Heatmap für die Auslastung der einzelnen Straßen. Die folgende Abbildung zeigt die Visualisierung der Heatmap.

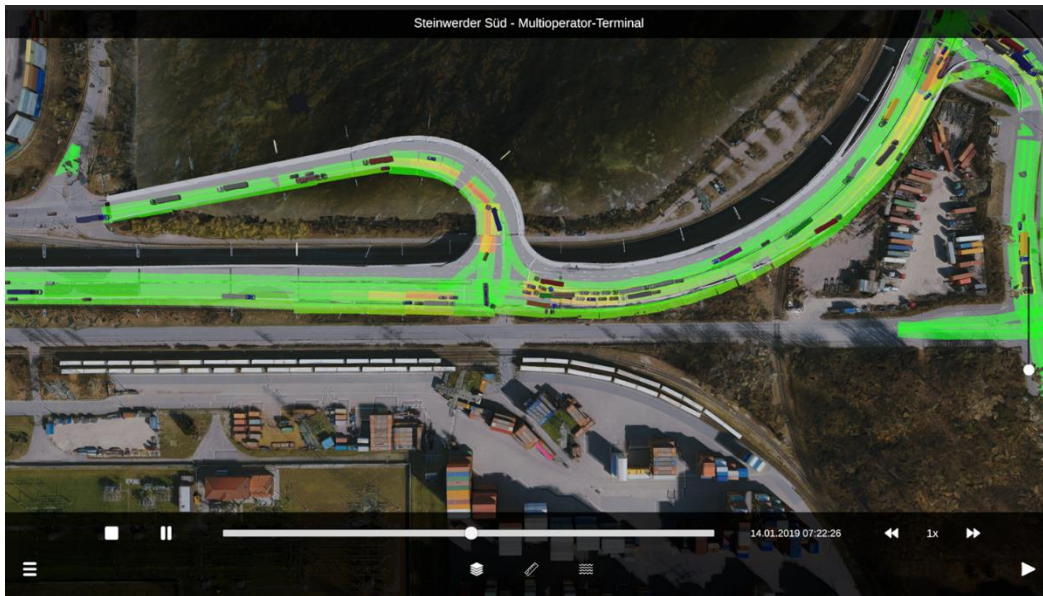


Abbildung 15: Darstellung der Heatmap im Hafenplanungstool

Weiterhin gibt es zusätzlich zum Touchtisch einen externen Bildschirm, der mit Inhalt gefüllt werden soll. HPC hat zusammen mit der HPA die darzustellenden Inhalte konzipiert. Einerseits soll die Möglichkeit geschaffen werden, die Emissionen des derzeit erfassten Verkehrs quantitativ abzubilden, und andererseits die Verkehrsqualität geplanter Maßnahmen darzustellen. Die folgende Abbildung 16 zeigt eine Darstellung des externen Bildschirms mit einem Beispieldatensatz.

Ampel ID: 105\_KB\_to\_RD

**Gesamtverkehr:**  
3789

Lkw-Fahrten pro Werktag

**Multi Operator Terminal (Dedicated Terminal)**  
Potenzielle Funktionen und Leistungen:  
Vorw. Abfertigung von Schiffen von an der Betreibergesellschaft beteiligten Reedereien Umschlagsbereich Schiff und Terminal, Containerlager, Umschlagbereich Terminal und Landtransportmittel (Schienen, Straße).  
Erwarteter Zusatzverkehr pro Werktag:  
LKW-Fahrten: 975      Züge: 10      PKW: 288

**Gesamtverkehr:**  
12627

Pkw-Fahrten pro Werktag

**Vergleich Ampelschaltung Optimierung**

Trafficflow	Ohne optimierte Ampelschaltung	Mit optimierter Ampelschaltung
KB West nach 105 - Geradeaus	11,46 s (8 Uhr - 9 Uhr)	20,9 s (8 Uhr - 7 Uhr)
KB West nach 105 - Links	37,95 s (8 Uhr - 7 Uhr)	62,77 s (8 Uhr - 7 Uhr)
KB Ost nach 105 - Geradeaus	28,62 s (8 Uhr - 7 Uhr)	42,2 s (18 Uhr - 18 Uhr)
KB Ost nach 105 - Rechts	7,5 s (8 Uhr - 7 Uhr)	8,06 s (8 Uhr - 8 Uhr)
Breitaker Str. nach 105 - Rechts	238,44 s (15 Uhr - 18 Uhr)	22,22 s (13 Uhr - 18 Uhr)
Breitaker Str. nach 105 - Links	305,33 s (15 Uhr - 18 Uhr)	40,58 s (13 Uhr - 18 Uhr)

	PKW	LKW
Länge	5 m	16 m
Beschleunigung	1,5 m/s²	1 m/s²
Anfahrtsverzögerung	0,5 - 1,5s	0,5 - 1,5s

**Gesamtverkehr:**  
16416

Lkw & Pkw Fahrten pro Werktag

Abbildung 16: Anzeige des externen Bildschirms

Auf dem externen Bildschirm sind sowohl die Eingabeparameter als auch die Ergebnisse der Verkehrssimulation und -optimierung zu sehen. Auf der linken

Seite wird der Gesamtverkehr an einer ausgewählten Kreuzung dargestellt. Am oberen Rand des Bildschirms finden sich ergänzende Informationen: einerseits eine Beschreibung der geplanten Nutzung des Hafenareals, andererseits die Darstellung des zusätzlichen Verkehrs, der durch diese Planung verursacht wird.

Im unteren mittleren Bereich ist der aktuelle Schaltplan der LSA abgebildet, da der Fokus in diesem Fall auf der Steuerung dieser Anlage an der betreffenden Kreuzung liegt. Rechts wird die Kreuzung innerhalb des übergeordneten Verkehrsnetzes visualisiert, darunter sind grundlegende Informationen zu den im Straßenverkehr vorkommenden Fahrzeugtypen zu finden.

Im Zentrum des Bildschirms befindet sich die zentrale Darstellung der Optimierungsergebnisse. Gezeigt wird die mittlere Wartezeit je Fahrtrichtung – sowohl auf Basis des ursprünglichen Schaltplans, der als Ausgangspunkt der Optimierung diente, als auch mithilfe des optimierten Schaltplans. Diese Gegenüberstellung ermöglicht eine direkte Bewertung der Effekte der Optimierung.

Eine umfassende Darstellung des Vorgehens und der Ergebnisse dieses Arbeitspaketes ist im Verbundabschlussbericht zu finden.

#### **4.2.6   Arbeitspaket 2.6: Testen entlang der Sprints / System- und Integrationstests**

Ziel dieses Arbeitspakets war die Implementierungen während der Entwicklung zu testen und anzupassen, sodass mit Abschluss der Entwicklungen ein funktionsfähiger Prototyp für die Fallstudie zur Verfügung steht.

Während HPA für das gesamte Arbeitspaket verantwortlich war, hat HPC die Simulation getestet. Hierbei gab es zwei Ansätze für das Testen: sogenannte Unit Tests für einzelne Funktionen in der Simulation, sowie ganzheitliche Tests des Simulationstools. Die folgende Abbildung zeigt die Konsolenausgabe eines Testlaufs für die Unit Tests:

```
Konsole
-----
UnitTest Sequence started at 2025/03/21 10:46:46.2930.
Performing 10 of 26 UnitTests.
UnitTest 1 (generateScenario) started at 2025/03/21 10:46:46.2930.
UnitTest 1 (generateScenario) completed at 2025/03/21 10:46:46.3060.
UnitTest 1 (generateScenario) passed.
UnitTest 8 (TrafficCounter) started at 2025/03/21 10:46:46.3100.
UnitTest 8 (TrafficCounter) completed at 2025/03/21 10:46:49.7530.
UnitTest 8 (TrafficCounter) passed.
UnitTest 11 (RoadCounterMatrix) started at 2025/03/21 10:46:49.7530.
UnitTest 11 (RoadCounterMatrix) completed at 2025/03/21 10:46:49.7690.
UnitTest 11 (RoadCounterMatrix) passed.
UnitTest 17 (RailCrossing) started at 2025/03/21 10:46:49.7690.
UnitTest 17 (RailCrossing) completed at 2025/03/21 10:46:53.2270.
UnitTest 17 (RailCrossing) passed.
UnitTest 19 (RouteFinding) started at 2025/03/21 10:46:53.2270.
UnitTest 19 (RouteFinding) completed at 2025/03/21 10:46:56.6750.
UnitTest 19 (RouteFinding) passed.
UnitTest 20 (SWSExistingRoadServices) started at 2025/03/21 10:46:56.6750.
UnitTest 20 (SWSExistingRoadServices) completed at 2025/03/21 10:46:56.6900.
UnitTest 20 (SWSExistingRoadServices) passed.
UnitTest 22 (VesselTraffic) started at 2025/03/21 10:46:56.6910.
UnitTest 22 (VesselTraffic) completed at 2025/03/21 10:47:07.0460.
UnitTest 22 (VesselTraffic) passed.
UnitTest 23 (SWSDigitalTwinImport) started at 2025/03/21 10:47:07.0620.
UnitTest 23 (SWSDigitalTwinImport) completed at 2025/03/21 10:47:10.5130.
UnitTest 23 (SWSDigitalTwinImport) passed.
UnitTest 24 (StopSigns) started at 2025/03/21 10:47:10.5130.
UnitTest 24 (StopSigns) completed at 2025/03/21 10:47:13.9670.
UnitTest 24 (StopSigns) passed.
UnitTest 25 (TrafficLightChanges) started at 2025/03/21 10:47:13.9720.
UnitTest 25 (TrafficLightChanges) completed at 2025/03/21 10:47:17.4240.
UnitTest 25 (TrafficLightChanges) passed.
UnitTest Sequence completed at 2025/03/21 10:47:17.4240.
10 of 10 UnitTests successful.
-----
```

Abbildung 17 Beispielhafte Konsolenausgabe eines Durchlaufs an Unit Tests

In diesem Beispiel wurden 10 von 26 Unit Tests durchgeführt. In diesen Unit Tests werden einzelne Funktionen in der Simulation getestet. Dies können Berechnungen sein, wie beispielsweise die Generierung des Szenarios oder die Zusammenstellung des existierenden Verkehrs. Es können aber auch Verhaltensweisen getestet werden, wie die Routenfindung oder das Verhalten bei Stoppschildern.

Bei einigen Funktionen war es leider unmöglich diese als abgeschlossenen Unit Test zu erstellen. In diesen Fällen wurden ganzheitliche Tests des Simulationstools durchgeführt, welche alle bisher implementierten Funktionen abbilden. Ebenso wurden auch Funktionstests mit dem Optimierer sowie dem Planungstool durchgeführt, um die Implementierung der Schnittstellen zu testen

### 4.3 Arbeitspaket 3 – Fallstudie Hamburger Hafen (Pilot)

Das dritte Arbeitspaket sah vor, dass der im vorigen Arbeitspaket entwickelte Prototyp in einem bestimmten Planungsbeispiel getestet werden sollte.

### 4.3.1 Arbeitspaket 3.1: Definition Planungsszenario und Datensammlung

Ziel dieses Arbeitspakets war es zu definieren, welche aktuell im Hamburger Hafen durchgeführte Planung für die Fallstudie des Hafenplanungstools ausgewählt werden soll.

Die HPA war in diesem Arbeitspaket im Lead. Zunächst musste entschieden werden, welches Areal genutzt werden soll. Hierfür wurden mehrere Standorte in Betracht gezogen. Am Ende standen zwei Areale im Hamburger Hafen zur Auswahl: Steinwerder Süd und die Hohe Schaar.

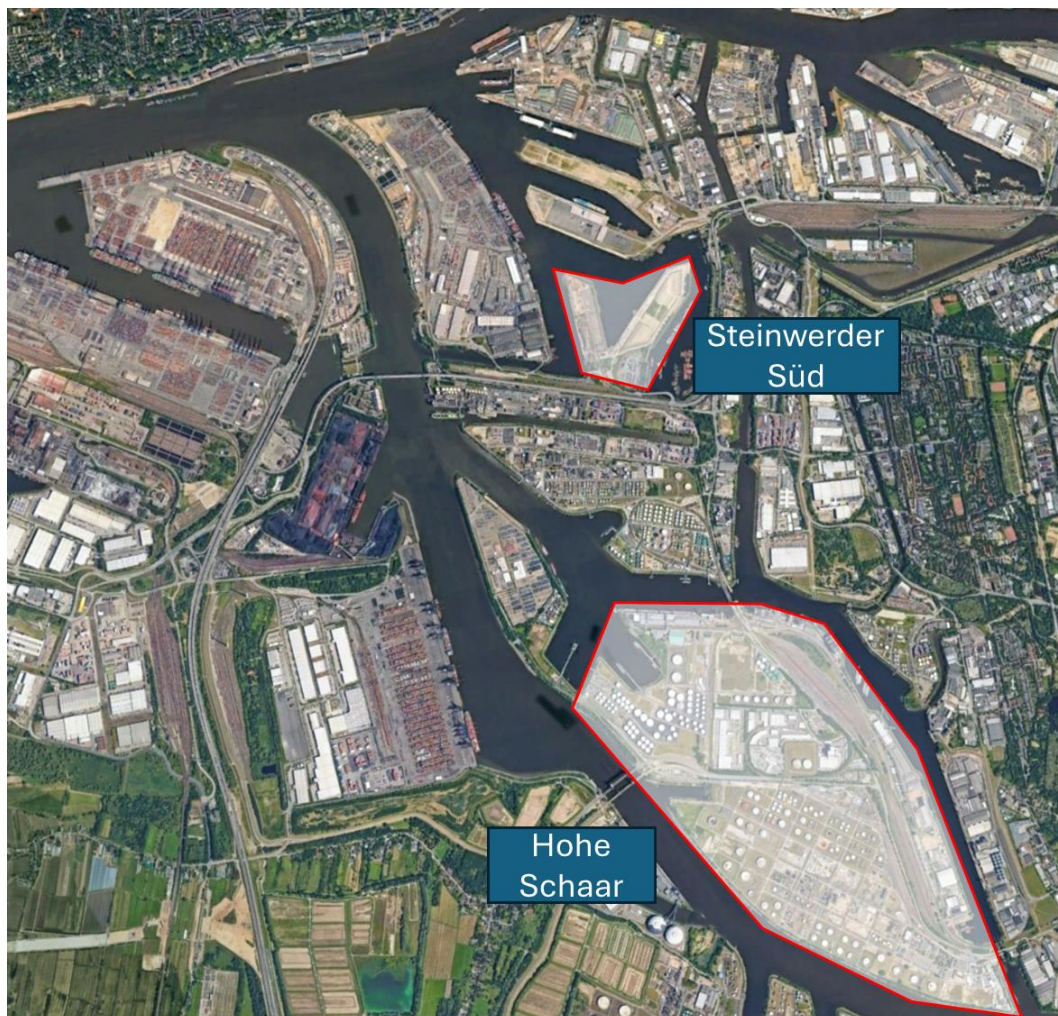


Abbildung 18 Darstellung der potentiellen Hafenareale für die Fallstudie

Aufgrund der exponierten Lage und der schon vorhandenen Planungsszenarien wurde sich für die Planung von Steinwerder Süd entschieden. Im Zuge des Planfeststellungsbeschlusses von 2022 gab es schon eine Verkehrsuntersuchung,

welche mehrere Nutzungsfälle der Fläche betrachtet hat. Diese Daten waren eine gute Grundlage, um die Planungsszenarien zu erstellen. HPC hat hierbei überprüft, inwieweit diese Planungsszenarien umsetzbar sind und was im Simulationstool anzupassen wäre.

Eine umfassende Darstellung des Vorgehens und der Ergebnisse dieses Arbeitspaketes ist im Verbundabschlussbericht zu finden.

### **4.3.2 Arbeitspaket 3.2: Modellaufbau für Fallstudie**

Ziel dieses Arbeitspakets war das ausgewählte Layout sowie die ausgewählten Nutzungsszenarien in den Prototyp einzupflegen, sodass dieser für die Testungen im folgenden Arbeitspaket nutzbar ist.

HPC hat das Input-Layout der Verkehrssimulation angepasst und erweitert. Durch den Aufbau der Verkehrssimulation ist es für das Simulationstool jedoch unwesentlich, ob ein neues Layout oder ein schon benutztes Layout genutzt wird, da sich die komplette Simulation immer von Neuem aufbaut. Dies bedeutet, dass zum Start der Simulation immer ein komplett leeres Layout im Tool vorhanden ist, welches dann anhand der Inputdaten gefüllt wird. Ebenso funktionieren auch die Szenarien und andere benötigte Daten: Alle Parameter können über die Inputdatei angepasst werden.

Durch das neue Layout der Fallstudie kam es jedoch zu Situationen kommen, die es im Test-Layout noch nicht gab. Daher musste das Tool noch an einigen Stellen angepasst werden. Ein Beispiel dafür ist schon in Kapitel 4.2.1 beschrieben. Durch das etwas vergrößerte Layout mussten die Verkehrsströme angepasst werden. Die neuen Zahlen aus den Messpunkten passten nicht zusammen, weswegen der Generator für die existierenden Verkehrsströme so angepasst werden musste, dass er kleine Unstimmigkeiten ignoriert. Im Folgenden ist das implementierte Wasserwegenetzwerk (links) und das Straßennetzwerk (rechts) zu sehen. Da das Straßennetzwerk nicht sehr gut mit dem Hintergrund im Simulationstool sichtbar ist, ist dieses hier ohne Hintergrund dargestellt.

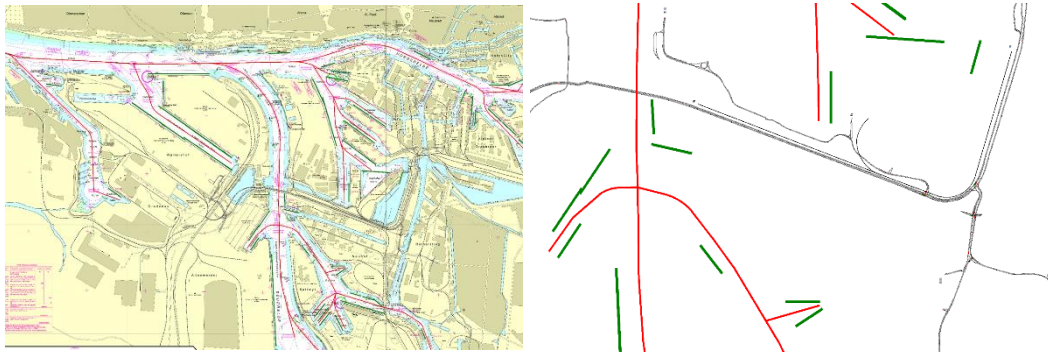


Abbildung 19 implementiertes Netzwerk für Steinwerder Süd

Da die Einstellungsmöglichkeiten des Simulationsmodells sehr vielfältig sind, wurde entschieden, dass im Prototyp nicht alle Parameter durch das Planungstool einstellbar sind, sondern schon fest hinterlegt werden. Hierfür hat HPC die nicht vom Planungstool einstellbaren Parameter in die Input-Datei eingepflegt.

Während des Testens der Fallstudie kam es zu einigen Fehlern im Modell, welche nur teilweise durch das Error-Management entdeckt wurden. Speziell ging es hier darum, dass sich durch eine ungünstige Verkettung von zufälligen Ereignissen ein bestimmtes Ereignis immer wieder aufgerufen hat, ohne dass Simulationszeit vergeht. Dieser Fehler ist durch einen internen Fehler in der Simulationssoftware entstanden. Daher stand HPC im Austausch mit dem Support des Softwareherstellers, damit der Fehler behoben werden kann.

Da das neue Layout in der Fallstudie größer ist als in den Tests für den Prototyp, benötigt die Simulation auch länger als vorher, insbesondere wenn die Fahrzeugbewegungen des Straßenverkehrs mitgeschrieben werden. In diesem Fall kann die Rückgabedatei mehrere Gigabyte groß werden. Daher wurde das Tool so umgebaut, dass es die Möglichkeit gibt einzustellen, welche Ergebnisse vom Simulationsmodell benötigt werden. Das bedeutet einerseits, dass man das Mitschreiben der Fahrzeugbewegungen einzelner Verkehrsträger ausschalten kann, aber auch, dass man die Dauer des Mitschreibens unabhängig von der Simulationslaufzeit festlegen kann.

### **4.3.3 Arbeitspaket 3.3: Exemplarische Anwendung des Planungsmodells für ausgewählte Anwendungsfälle der Fallstudie**

Im Rahmen von AP 3.3 wurde der in AP 2 entwickelte Prototyp zusammen mit dem in AP 3.1 und AP 3.2 erarbeiteten Planungsszenario erstmals in einem praxisnahen Test eingesetzt. Dabei galt es, verschiedene Entwicklungsoptionen für das Areal Steinwerder Süd zu erproben und zu prüfen, welchen Mehrwert ein

digitales Hafenplanungstool gegenüber klassischen Planungsmethoden liefern kann.

Die HPA war federführend in diesem Arbeitspaket. Es wurden mehrere Nutzungsvarianten erstellt und Sensitivitätsanalysen gemacht, welche in Workshops mit Hafenplanern der HPA getestet wurden. HPC war bei der Vorbereitung des Workshops und der Durchführung beratend tätig und stand für Rückfragen bezüglich des Simulationstools bereit. Durch die Laufzeit der einzelnen Simulationsläufe, ist es nicht möglich, diese vor Ort zu starten und direkt Ergebnisse zu erzielen. Daher hat sich das Konsortium dazu entschieden, dass die Simulationsläufe für die Test-Sessions schon vordefiniert und durchgelaufen sind. Das hat den Vorteil, dass diese dann während der Test-Session direkt verfügbar sind. HPC hat diese Szenarien durchlaufen lassen und die Ergebnisse bereitgestellt. Ebenso hat HPC eine Anleitung zur Benutzung des Simulationstools erstellt.

Eine umfassende Darstellung des Vorgehens und der Ergebnisse dieses Arbeitspaketes ist im Verbundabschlussbericht zu finden.

#### **4.3.4 Arbeitspaket 3.4: Auswertung der Anwendungsergebnisse und Toolanpassung**

Ziel des AP ist es, die Anwendungsergebnisse zu bewerten und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen. Die Anwendung wurde rollierend verschiedenen möglichen Anwendergruppen präsentiert und gemeinsam evaluiert.

Beispielsweise wurde der Bestandsverkehr auf der Straße mit der Straßenverkehrsabteilung iterativ evaluiert und validiert, sodass das Simulationstool den Straßenverkehr möglichst realitätsgetreu darstellt

Im Laufe der Tests des Planungstools traten im Simulationsmodell neue Fehler auf, die behoben werden mussten. Da das Problem jedoch software-intern auftrat, musste die Software mit den Bug-Fixes aktualisiert werden. Dennoch traten weiterhin wiederholt Fehler auf, die auf das bestehende Fahrzeugverhalten bei Interaktionen mit anderen Fahrzeugen zurückzuführen waren. Zunächst wurde versucht, die jeweiligen Situationen zu identifizieren und punktuelle Anpassungen vorzunehmen. Da dieses Vorgehen jedoch schnell sehr detailliert und unübersichtlich wurde, entschied sich HPC für eine vollständige Neuentwicklung der Interaktionslogik. Diese grundlegende Überarbeitung führte dazu, dass auch in nachfolgenden Optimierungstests mit stark variierenden Parametern keine Fehler mehr auftraten.

Im Rahmen der Testphase des Optimierers wurde HPC von IFOR mehrfach mit kleineren Anpassungswünschen zu den Rückgabewerten der Simulation aber auch Fehlern kontaktiert. Insbesondere im Zusammenhang mit der Emissionsoptimierung wurde der Wunsch geäußert, die Emissionen aggregiert und nicht einzeln pro Ereignis und Straßensegment darzustellen. HPC hat diese Anpassungen implementiert und die aktualisierte Version an IFOR übermittelt.

#### 4.4 Arbeitspaket 4 – Transferpotential

In diesem Arbeitspaket wurde die Übertragbarkeit des in den vorherigen Arbeitspaketen entwickelten Tools auf andere Orte und Bereiche überprüft und bewertet.

##### 4.4.1 Arbeitspaket 4.1: Übertragbarkeit des entwickelten Verfahrens und Demonstrators auf andere Hafenstandorte

Das Transferpotenzial wurde so ermittelt, dass zunächst weitere potenzielle Anwendungsfälle für das Tool identifiziert wurden. Darauf aufbauend wurden die dafür erforderlichen Anpassungen bestimmt. Diese Anpassungen wurden analysiert und hinsichtlich ihrer Implementierungsmöglichkeit bewertet.

Zunächst wurden in Workshops Anwendungsfälle im Hafen bestimmt. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über diese Anwendungsfälle:

Tabelle 4: Mögliche Anwendungsfälle im Hafen

Mögliche Anwendungsfälle	
Häfen mit Schleusen	gesamter Hafen
Schüttgutterminals	Fährterminals
Stückgutterminals	Kreuzfahrtterminals
Flüssiggutterminals	Autoverladeterminals

Die meisten Anwendungsfälle sind unterschiedliche Terminalarten. In diesen Anwendungsfällen wurde darauf geachtet, dass diese immer mit einem Wasseranschluss verbunden sind. Logistikzentren o.ä. sind zwar auch im Hafen zu finden, benötigen jedoch keinen Anschluss ans Wasser. Daher sind sie in dem nachfolgenden Arbeitspaket zu finden.

Für jeden dieser Anwendungsfälle wurden anschließend Funktionalitäten definiert, die zur Umsetzung notwendig sind. Diese wurden in thematische Cluster gruppiert, wie in der untenstehenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 5: Thematische Cluster der Funktionalitäten

Thematische Cluster	
neuer Modus im Modal Split	Schiffsverkehr
neues Verkehrsmittel	Daten
Andere Ladeeinheit	Optimierung
Verkehrsaufkommen/ -verteilung	3D Visualisierung
Parkverhalten	3D Interaktion
Straßenverkehrsführung	

Die identifizierten Funktionalitäten wurden anschließend hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit bewertet. Hierzu wurden verschiedene Erfüllungslevel definiert, die jeweils eine spezifische Gewichtung besitzen. Die verwendeten Level sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Tabelle 6: mögliche Erfüllungslevel der Funktionalitäten

Mögliche Erfüllungslevel	Beschreibung	Bewertung
1	Vollständig implementiert	1
2	Fast vollständig implementiert	10
3	Sehr einfach zu implementieren	100
4	Einfach zu implementieren	1.000
5	Schwer zu implementieren	10.000
6	Nicht implementierbar	9.999.999

Die Erfüllungslevel sind folgendermaßen zu lesen:

- **Vollständig implementiert:** Die Funktionalität kann 1:1 übernommen und direkt genutzt werden.
- **Fast vollständig implementiert:** Die zugrunde liegende Logik bleibt erhalten, es müssen jedoch Faktoren, APIs oder neue Parametersätze angepasst werden.
- **Sehr einfach zu implementieren:** Eine neue Struktur ist erforderlich, z. B. durch Anpassung von Berechnungsformeln, jedoch ist sie ähnlich zur bestehenden.
- **Einfach zu implementieren:** Die Funktionalität ist in der aktuellen Struktur nicht vorhanden, lässt sich aber relativ leicht ergänzen, etwa durch einfache technische Erweiterungen wie Pipelines oder Förderbänder.

- **Schwer zu implementieren:** Größere strukturelle Änderungen an der Systemarchitektur sind notwendig.
- **Nicht implementierbar:** Die Umsetzung ist mit vertretbarem Aufwand nicht möglich.

Die Bewertung der Erfüllungslevel wurde so konzipiert, dass sie die gestaffelte Umsetzbarkeit der Funktionalitäten realitätsnah abbildet. Dabei wurde ein bewusst nicht-linearer Anstieg gewählt, um dem Umstand Rechnung zu tragen, dass mehrere einfach umsetzbare Funktionen in Summe oft effizienter realisiert werden können als eine einzelne komplexe Anpassung. Diese Bewertungslogik fördert eine Priorisierung von Maßnahmen mit einem hohen Verhältnis aus Nutzen und Implementierungsaufwand. Gleichzeitig wird der wachsende Ressourcenbedarf bei zunehmender Komplexität durch exponentiell steigende Bewertungswerte berücksichtigt.

Anhand der benötigten Anpassungen und den dazugehörigen Erfüllungsleveln wurden anschließend die einzelnen Anwendungsfälle bewertet. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Umsetzbarkeit der ausgewählten Anwendungsfälle

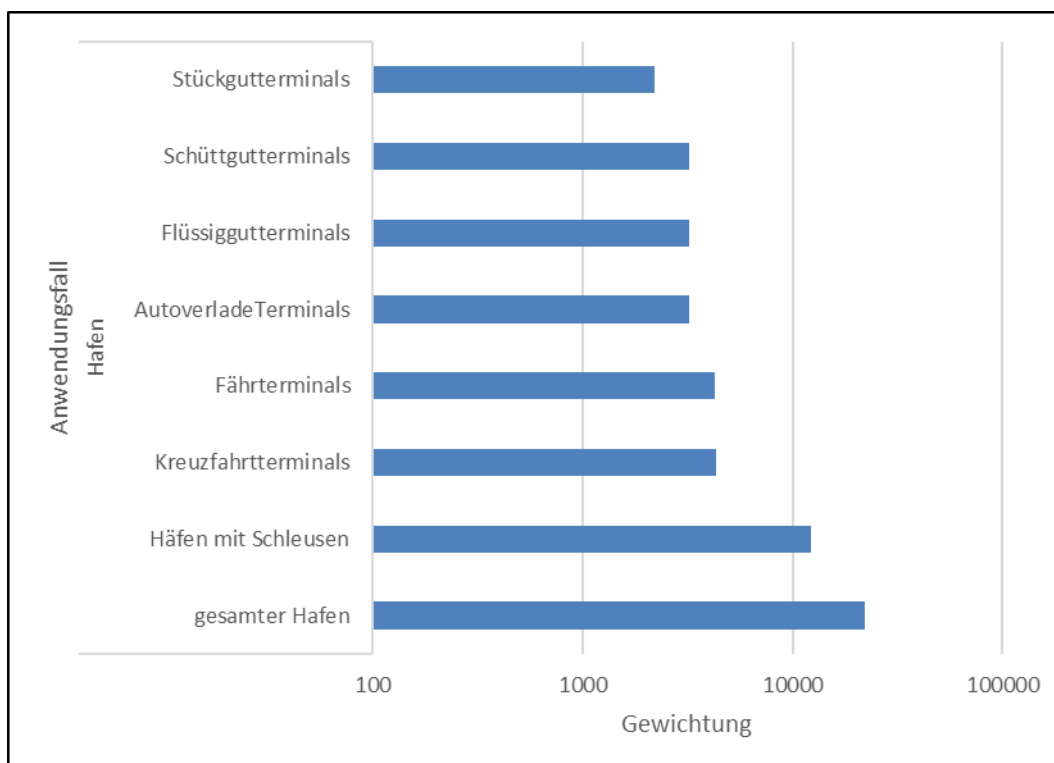


Abbildung 20: Bewertung der Umsetzbarkeit der Anwendungsfälle im Hafen

Die Abbildung zeigt, dass keiner der Anwendungsfälle direkt umsetzbar ist. Jedoch sind die meisten Anwendungsfälle mit überschaubarem Aufwand im Tool

umsetzbar. Lediglich die Anwendungsfälle „Hafen mit Schleuse“ und „gesamter Hafen“ sind schwer umzusetzen. Das liegt in dem ersten Fall an der Anpassung der Routenfindung der Schiffe bei Nutzung der Schleusen. In dem zweiten Fall ist die Komplexität der Verkehrssimulation sowie der Optimierung ausschlaggebend für die schwierigere Umsetzung.

Viele der Bewertungen hängen jedoch vom konkreten Fall ab. Für die 3D Visualisierung wird das Geoinformationssystem (GIS) der HPA verwendet. Für alle Anwendungsfälle, die ebenfalls im Gebiet des Hamburger Hafens lokalisiert sind, kann die bestehende ArcGIS-Anbindung weiter genutzt werden. Bei Bedarf könnten weitere Kartenlayer hinzugefügt werden, dazu würde jeweils (i) der Code erweitert werden müssen, um die Layer über Parameter (z.B. URL, Typ) zu spezifizieren, sowie (ii) ein entsprechender Button in das User Interface (UI) eingefügt werden müssen, um Nutzern das Ein- und Ausblenden der Kartenlayer zu ermöglichen. Für alle Anwendungsfälle, die außerhalb des Gebiets des Hamburg Hafens lokalisiert sind, müsste zunächst geprüft werden, ob für das entsprechende Gebiet ebenfalls ein GIS zur Verfügung steht, das zur Einbindung in die 3D Visualisierung genutzt werden kann. Sollte ein anderer Anbieter als ArcGIS verwendet werden, müsste eine entsprechende neue Schnittstelle implementiert werden. Sollte ArcGIS zur Verfügung stehen, könnte die bestehende Anbindung verwendet werden, jedoch müsste der für die Authentifizierung zuständige Programmcode entsprechend angepasst werden.

Analog dazu verhält es sich mit dem Straßenlayout. Hierzu wurde im Projekt OpenStreetMap genutzt. Es beinhaltet alle Straßen des jeweiligen Gebiets, wobei Geopositionen, Straßennamen, Anzahl der Spuren und weitere Parameter hinterlegt sind. Indem die Verkehrssimulation ebenfalls dieses Straßenlayout verwendet, können Fahrzeuge in der 3D Visualisierung anhand der im Layout hinterlegten Daten geopositioniert dargestellt werden. Diese Datenquelle kann für alle weiteren Anwendungsfälle auch außerhalb des Hamburger Hafens verwendet werden, indem lediglich die Koordinate des Mittelpunkts des als Straßenlayout benötigten Gebiets im Code angepasst werden muss. Da die Datengrundlage von OpenStreetMap communitybasiert erstellt wird, besteht keine Garantie für akkurate Daten. Daher ist nicht auszuschließen, dass manuelle Anpassungen des Straßenlayouts notwendig sind.

Ebenso verhält es sich mit der Optimierung. Beide Anwendungen des Optimierungstools (der Service-Generator und der Optimierer zur Ampelsteuerung) lassen sich grundsätzlich leicht an verschiedene Szenarien anpassen, dennoch sind einige Anmerkungen wichtig. Das Transferpotenzial des Service-Generators hängt von der jeweiligen Nutzerstudie ab. In der vorliegenden Fallstudie war aufgrund der Anordnung der Verkehrszähler im Hafenbereich nur eine einzige Lösung möglich. In einem solchen Fall, in dem es nur eine eindeutige

Lösung gibt, ist die Übertragbarkeit hoch, und es wären lediglich kleinere Anpassungen erforderlich. Die Formeln müssten für die neue Nutzerstudie aktualisiert werden – etwa hinsichtlich der Anzahl der Verkehrszähler, der möglichen Routen und der Fahrzeuganzahl an jedem Zähler.

Je nach gewählter Region oder Anwendungsfall kann es jedoch mehrere Wege zwischen dem gleichen Start- und Zielpunkt geben, wobei nicht genügend Verkehrszähler vorhanden sind, um die Routen zu unterscheiden. Mit anderen Worten: In der Modellierung sehen beide Routen identisch aus. Dies könnte beispielsweise dann der Fall sein, wenn eine hohe Komplexität gefordert ist (z. B. wenn ein gesamter Hafen mit allen möglichen Straßen analysiert wird) oder wenn das Verhalten der Fahrer eine entscheidende Rolle spielt (z. B. wenn die Routenwahl von der Straßenführung abhängt). In solchen Fällen müsste ein neues Modell entwickelt werden. Es könnte beispielsweise angenommen werden, dass sich der Verkehr gleichmäßig auf beide Routen verteilt, oder dass eine Präferenz für eine Route besteht – etwa basierend auf der Entfernung oder der geschätzten Fahrzeit.

Auch das Transferpotenzial der Ampeloptimierung hängt von der jeweiligen Nutzerstudie ab. In diesem Projekt wurden vier Kreuzungen modelliert, wobei die Optimierung jedoch jeweils nur für eine Kreuzung möglich war. Nur eine Kreuzung hatte einen signifikanten Einfluss auf das Verkehrsaufkommen, daher wurde nur dieses Ampelsystem bewertet.

Zunächst ist zu betonen, dass sich diese Funktion grundsätzlich leicht an verschiedene Straßen- und Kreuzungskonfigurationen anpassen lässt. Dennoch ist ein gewisser Aufwand nötig, um die Besonderheiten jeder Kreuzung zu modellieren. Es ist wichtig, die Ampeln in Phasen zu gruppieren, wobei auch auf die Kompatibilität der Lichtsignale zu achten ist – es dürfen sich keine Straßen gleichzeitig kreuzen, wenn beide Grün haben. Daher sind im Modell gewisse Anpassungen des Codes erforderlich, um die spezifischen Parameter der jeweils betrachteten Kreuzung zu berücksichtigen.

Je nach Anwendungsfall können jedoch umfangreichere Änderungen notwendig sein. In der vorliegenden Fallstudie gab es keine Kaskadeneffekte, sodass keine lokalen Optima zu erwarten waren. In einem anderen Szenario, bei dem die Optimierung einer Kreuzung Auswirkungen auf andere hat (z. B. wenn neue Engpässe entstehen), sind hingegen lokale Optima möglich – hierfür wäre dann eine neue Heuristik erforderlich, da die bestehende nicht für globale Optima geeignet ist. Auch könnten mehrere Kreuzungen gleichzeitig in die Optimierung einbezogen werden müssen. Das Problem hierbei ist, dass mit wachsender Größe des Optimierungsproblems (mehr Entscheidungsvariablen) auch die Rechenzeit steigt. Da auch die Simulation selbst eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt, ist es

wichtig, ein Verfahren mit guter Konvergenzgeschwindigkeit zu wählen. Anwendungsfälle, bei denen starker Verkehr aus verschiedenen Richtungen auftritt (z. B. bei mehreren Hafenterminals oder Veranstaltungen mit mehreren Ausgängen), sind anfällig für solche Situationen. In diesen Fällen ist ein erheblicher Aufwand erforderlich, um das bestehende Tool an die neue Nutzerstudie anzupassen.

Zusammenfassend gibt es zwei Hauptsituationen bei neuen Anwendungsfällen: Die erste ist, dass nur eine Kreuzung modelliert werden muss – in diesem Fall ist die Übertragbarkeit vergleichsweise einfach. Die zweite Situation erfordert deutlich mehr Aufwand: Es müssen nicht nur mehrere Kreuzungen analysiert, sondern auch eine neue Methodik implementiert werden, damit das Projekt erfolgreich ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Tool grundsätzlich vergleichsweise einfach auf andere Anwendungsfälle im Hafen übertragen werden kann. Einige Szenarien lassen sich dabei leichter umsetzen als andere. Der Aufwand hängt jedoch stark vom konkreten Fall, der Verfügbarkeit relevanter Daten und der Komplexität des jeweiligen Anwendungsfalls ab.

#### **4.4.2 Arbeitspaket 4.2: Erweiterbarkeit des Demonstrators für andere Fragestellungen in der Logistikbranche**

Zusätzlich zu anderen Standorten im Hafen stellte sich auch die Frage, inwieweit das Tool auch in der Logistikbranche nutzbar wäre. Hier wurden zunächst auch die Anwendungsfälle identifiziert und in drei Kategorien unterteilt:

Tabelle 7: Mögliche Anwendungsfälle in der Logistikbranche

<b>Kategorie</b>	<b>Mögliche Anwendungsfälle</b>
Industrie und Logistik	Intermodal Terminals
	Produktionsindustrie
	Verbrauchsindustrie
	Produktion und Verbrauch
	Logistikunternehmen
	Flughäfen
	Bahnhöfe
	Autozugverladung
Planung	Baustellenplanung
	Umleitungen
	ÖPNV Planung
Sonstige Zentren	Veranstaltungszentren
	Einkaufszentren

Kategorie	Mögliche Anwendungsfälle
	Bürokomplex
	Wohngebiet
	Innenstadt
	Parkhäuser/-plätze
	Schulen/Kitas
	Freizeitpark
	Krankenhaus

Die identifizierten Anwendungsfälle sind breit gestreut in den Kategorien Industrie und Logistik, Planung und Sonstige Zentren. Es gibt einige neue Funktionen, die den Clustern in Tabelle 5 hinzugefügt wurden. Ebenso wurden die Erfüllungslevel aus Tabelle 6 angewandt. Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der Bewertung:

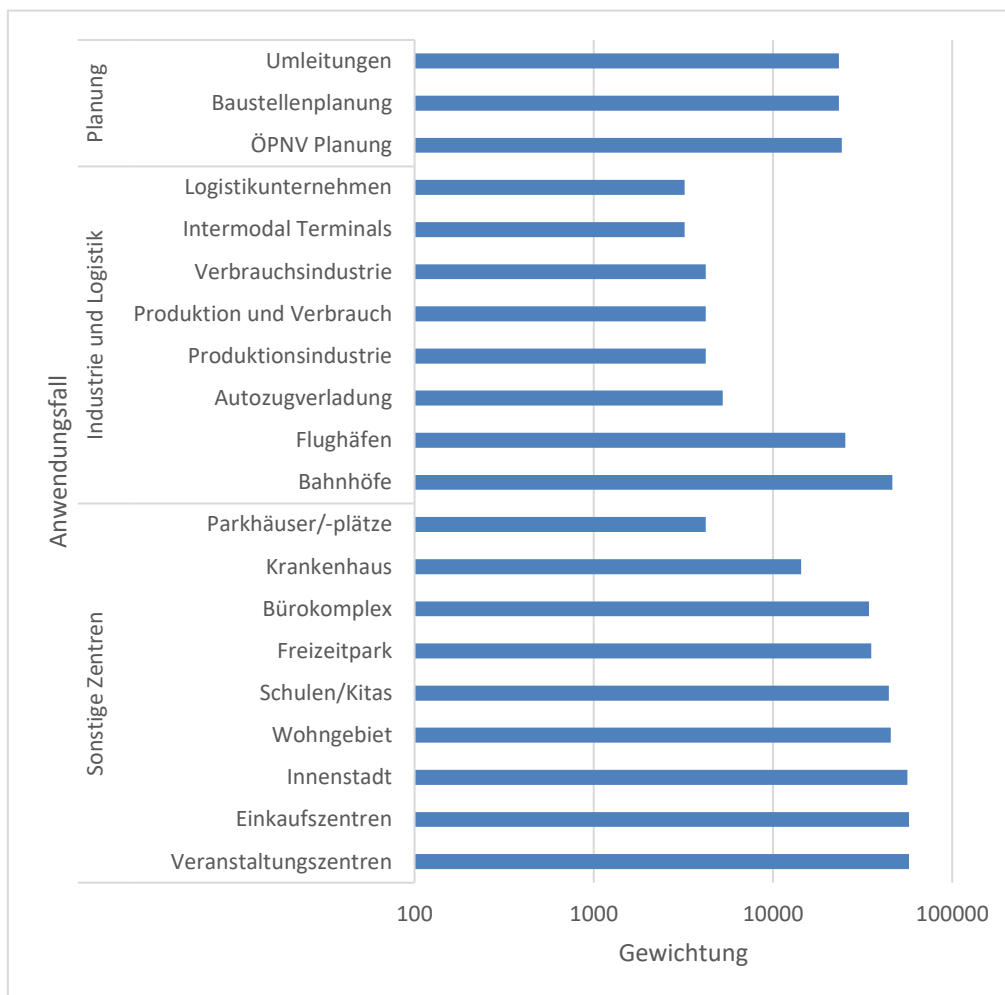


Abbildung 21: Bewertung der Umsetzbarkeit der Anwendungsfälle in der Logistik

Die Abbildung zeigt, dass einige Anwendungsfälle einfacher umzusetzen sind als andere. Dazu gehören die meisten Fälle aus der Industrie und Logistik, da diese von der Logik her sehr ähnlich sind wie Seehafenterminals. Die Planungsfälle sowie die sonstigen Zentren hingegen sind deutlich schwieriger umzusetzen. Dies liegt hauptsächlich daran, dass hier neue Verkehrsmittel genutzt werden (zu Fuß, Fahrrad, ÖPNV) und die Umsetzung dieser Funktionen sehr komplex werden kann.

Insgesamt ist die Umsetzbarkeit, wie auch im Transferpotential im Hafen, von dem konkreten Fall abhängig.

#### **4.5      Arbeitspaket 5 – Projektkoordination und -administration, Öffentlichkeitsarbeit**

Dieses Arbeitspaket lief über alle Projektphasen und betraf die Bereiche Projektkoordination und -administration sowie die Öffentlichkeitsarbeit.

##### **4.5.1      Arbeitspaket 5.1: Projektkoordination und -administration**

Die HPA war für die Projektkoordination und -administration zuständig. HPC hat an den Projekttreffen teilgenommen und auch abseits der zweiwöchentlichen Regeltermine, sowie der Meilensteinmeetings, selbst Treffen initiiert, sofern diese notwendig waren.

Eine umfassende Darstellung des Vorgehens dieses Arbeitspaketes ist im Verbundabschlussbericht zu finden.

##### **4.5.2      Arbeitspaket 5.2: Öffentlichkeitsarbeit**

Das Ziel dieses AP besteht aus der Sicherstellung des kontinuierlichen IHATEC internen sowie öffentlichkeitswirksamen Austausches der Projektergebnisse.

HPC hat hierbei mit einem Beitrag bei der Plant User Conference 2024 mit dem Titel „Planning and simulation of ports and terminals using Digital Triplets“ beigetragen. Die vollständige Auflistung aller Veröffentlichungen und Vorträge ist in Kapitel 5.6 sowie dem Verbundabschlussbericht zu finden.

---

## 5. FÖRDERERFOLG

---

### 5.1 Verwendung der Zuwendung des erzielten Projektergebnisses

#### Notwendigkeit der Zuwendung und erreichte Ziele

Die Entwicklung des Hafenplanungstools ist außerordentlich komplex und erfordert verschiedenste Kompetenzen. Die durch das IHATEC II Programm initiierte und ermöglichte Kooperation mit der HPA als Praxispartner und mit den beiden wissenschaftlichen Instituten der Hamburger Universität werden Wissen und Erfahrungen zusammengetragen und weitergeführt, die in der Form ohne Förderung nie stattgefunden hätte. Nur durch den Zusammenschluss der Kompetenzen der am Konsortium beteiligten Partner kann die Forschungsarbeit an dem System in der beschriebenen Form umgesetzt werden.

Für die Entwicklung des Hafenplanungstools, speziell des Simulationstools, mussten verschiedene Module und Schnittstellen entwickelt werden (siehe Kapitel 4). Daher sind auf Seiten der HPC insbesondere Personalkosten während der Entwicklungs- bzw. Projektphase angefallen. Insgesamt wurde zu Projektstart davon ausgegangen, dass für die Entwicklung des Hafenplanungstools 156 Personenmonate (PM) während der fünf Projektphasen erforderlich sind. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass HPC die Investitionen für die Entwicklung des Hafenplanungstools allein nicht hätte stemmen können. Diese Entwicklungskosten und -risiken konnten im Rahmen des Projektes sowohl durch die Kompetenz der antragsstellenden Partner als auch durch eine finanzielle Unterstützung maßgeblich reduziert werden.

Konkret konnten durch die Zuwendung die Projektziele in hohem bis sehr hohem Umfang erreicht werden. So wurden im Rahmen des Projektes Anforderungen an das Tool spezifiziert und die sich daraus ergebenden Systemkonzeption und Schnittstellendefinition durchgeführt (Arbeitspaket 1, siehe Abschnitt 4.1). Aus diesen Anforderungen wurde ein Prototyp zur Hafenplanung entwickelt (Arbeitspaket 2, siehe Abschnitt 4.2). Dieser Prototyp wurde in der Fallstudie der Flächenplanung für Steinwerder Süd getestet und verbessert (Arbeitspaket 3, siehe Abschnitt 4.3). Zuletzt konnten die Markt- und Transferpotentiale des Tools evaluiert werden (Arbeitspaket 4, siehe Abschnitt 4.4).

Die nachstehende Tabelle gibt einen Überblick über die Ziele der einzelnen Arbeitspakete und deren Erfüllung.

Tabelle 8 Erreichung der Ziele

AP	Ziel	Erfüllt
<b>1</b>	<b>Die Anforderungen an das System sind definiert und dokumentiert. Unter Berücksichtigung der subsystemspezifischen Schnittstellen sind die Anforderungen in User Stories für die Entwicklung kondensiert.</b>	✓
1.1	Ein Spezifikationsdokument ist erstellt, das die fachlichen und technischen Anforderungen für die Entwicklung des Tools in User Stories gebündelt darstellt.	✓
1.2	Vollständig dokumentierte Spezifikation des in AP 2 zu implementierenden Tools, bestehend aus den Einzelkomponenten, deren jeweiligen Funktionalitäten sowie die Kommunikation zwischen den Komponenten.	✓
<b>2</b>	<b>Nach Bearbeitung des APs liegt ein funktionsfähiger und getesteter Prototyp des Hafenplanungstools basierend auf einem simulationsfähigen Digitalen Zwilling, vor, der nach den in AP 1 spezifizierten Vorgaben entwickelt wurde, und nachfolgend in AP 3 für die Fallstudie "Hamburger Hafen" genutzt werden kann.</b>	✓
2.1	Nach Abschluss des AP steht die Komponente „Optimierer“ des Hafenmasterplanungstools prinzipiell zur Verfügung. Das Modul selbst ist für sich auf der Basis der Testinstanz getestet und wird in AP 2.6 mit den weiteren Komponenten integriert.	✓
2.2	Nach Beendigung des APs sind alle erforderlichen Schnittstellen zwischen den Einzelkomponenten des digitalen Hafenmasterplanungstools spezifiziert, entwickelt und getestet. Die Einzelkomponenten können die erforderlichen Informationen untereinander austauschen.	✓
2.3	Nach Abschluss des APs steht der Digitale Zwilling als Komponente des Hafenmasterplanungstools zur Verfügung. Der Digitale Zwilling selbst ist für sich getestet und wird in AP 2.6 mit den weiteren Komponenten integriert.	✓
2.4	Beendigung des APs steht eine auf verschiedene Plattformen optimierte Visualisierung der Ergebnisse des digitalen Hafenmasterplanungstools zur Verfügung. Die Visualisierung ist getestet und bereit für die Integration mit den weiteren Komponenten.	✓
2.5	Ergebnis des AP sind eine Reihe von Methoden zur Interaktion mit mehrdimensionalen Problem- und Entscheidungsräumen für die Hafenplanung mithilfe von Multi-Touch-Tischen, VR-Headsets sowie anderen mobilen Geräten.	✓
2.6	Die Teststrategie während der Entwicklung wird als erfolgreich umgesetzt betrachtet, wenn die generischen Einzelkomponenten für die spätere Nutzung in einem Gesamtsystem zusammengeführt sind und der Prototyp für die Fallstudie Hamburger Hafen freigegeben ist.	✓
<b>3</b>	<b>Das Ziel ist der Proof-of-Concept am Beispiel einer Flächenentwicklung im Hamburger Hafen. Logistische, Verkehrstechnische und umweltrelevante Zielgrößen können ausgewertet werden und ein optimales Ergebnis des Planungsszenarios liegt vor.</b>	✓
3.1	Ziel ist es, ein Planungsszenario auszuwählen und zu spezifizieren, welches möglichst viele unterschiedliche Aspekte betrifft und Wechselwirkungen aufweist. Das Planungsszenario muss dafür verschiedene Varianten beinhalten. Eine Möglichkeit wäre zum Beispiel die Ausbauplanung einer Fläche mit entweder einem Container-Terminal, einem Wasserstoff-Terminal oder Lagerhallen für die Hafenlogistik. Für jede Variante müssen die Auswirkungen auf den Verkehr (Wasser, Straße & Schiene) simuliert und die Auswirkungen auf die Umwelt und das Klima analysiert werden können.	✓

AP	Ziel	Erfüllt
3.2	Das Hafenmasterplanungstool ist für den geplanten Testfall vollständig eingerichtet und getestet, um es im AP 3.3 anwenden zu können.	✓
3.3	Ziel ist es, die Anwendung unter Zuhilfenahme von bereits durchgeführten Untersuchungen und Ausgangsparametern einer Sensitivitätsanalyse und falls möglich auch einer Validierung zu unterziehen. Dies geschieht durch den späteren Nutzerkreis mit anschließender Übergabe der Ergebnisse an die entwickelnden Projektpartner.	✓
3.4	Die Funktionsfähigkeit und Nutzbarkeit des Hafenmasterplanungstools wurden untersucht, und evtl. erforderliche Anpassungen wurden durchgeführt. Das Tool kann im Sinne eines Prototyps als „einsatzfähig“ betrachtet werden.	✓
<b>4</b>	<b>Es wird aufgezeigt, ob und wie der Prototyp auf verwandte Anwendungsgebiete übertragbar und für andere Einsatzgebiete im Hafen nutzbar ist.</b>	✓
4.1	Die Nutzbarkeit des Hafenmasterplanungstools für andere Hafenstandorte wurde bewertet und evtl. notwendige Anpassungen wurden identifiziert.	✓
4.2	Die Nutzbarkeit des Hafenmasterplanungstools für Fragestellungen anderer Logistik-bereiche wurde bewertet und evtl. notwendige Anpassungen wurden identifiziert.	✓
<b>5</b>	<b>Das Projekt ist erfolgreich durchgeführt und der durch das Projekt erzielte Mehrwert öffentlich präsentiert.</b>	✓
5.1	Erfolgreiche interne und externe Koordination und Kommunikation, um im beantragten Budget und Zeitrahmen die Projektziele zu erreichen. Dieses Arbeitspaket begleitet das Projekt über die gesamte Dauer von Projektbeginn bis zum Projektabschluss.	✓
5.2	Regelmäßige mediale Veröffentlichungen über die Projektlaufzeit sind erfolgt (min. zwei) und zum Ende der Projektlaufzeit ist eine wissenschaftliche Veröffentlichung entweder bereits erfolgt oder eine Einreichung bei einer Fachkonferenz/Fachzeitschrift steht in Aussicht. Die Projektpartner haben jeweils an zumindest einer Fachkonferenz teilgenommen und die Projektinhalte beworben. Das Abschlusstreffen ist durchgeführt und das aktive mediale Bewerben hat sowohl zu Input von außen geführt als auch eine Perspektive für die weitere Entwicklung geschaffen.	✓

Zusätzlich zu den Zielen der Erstellung des Prototyps gab es mehrere SMARTe Ziele. Diese lassen sich grob in mehrere Kategorien unterteilen.

Eine Kategorie ist die Reduktion der Planungszeit. Dazu gehören die Reduktion der Gesamtbearbeitungszeit, die Reduktion der Anpassungszeit, Reduktion der nachträglichen Änderungen und die Reduktion der Genehmigungsphasen. Hier wurde die Zielerreichung durch Umfragen mit potenziellen Nutzergruppen quantifiziert. Grundsätzlich wird erwartet, dass die Ziele bei konsequenter Umsetzung und Implementierung von Prozessen (nahezu) erreicht werden können.

Die zweite Kategorie ist die operative Verbesserung. Speziell ging es um die Reduzierung der Staus um 5 % oder die Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. In dem kleinen Fallbeispiel Steinwerder Süd konnten die Spitzenwartezeiten signifikant

reduziert werden. Eine umfassende Reduzierung des Staus um 5% müsste in einem deutlich größeren Verkehrsnetz überprüft werden. Ähnlich ist es mit der Einsparung von CO<sub>2</sub>. Erste Tests im Schiffs- und Straßenverkehr zeigen eine Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Dies müsste jedoch auch in einem größeren Netzwerk verifiziert werden.

Die dritte Kategorie ist die Akzeptanz der Bürger. Hier hat sich gezeigt, dass das Tool die Menschen abholt und einlädt, mitzugestalten. Konkrete Aussagen sind aber erst bei kompletter Anwendung in einem Planungsszenario zu treffen.

Die vierte Kategorie ist die Reduzierung von Kosten. Einerseits bei der Erstellung des Plans andererseits auch dem Verhindern von Fehlinvestitionen. Diese Ziele können quantitativ noch nicht nachgewiesen werden, jedoch wird eine Reduktion des zeitlichen Aufwandes auch eine Reduktion des monetären Aufwands mit sich bringen. Auch Fehlinvestitionen könnten frühzeitig aufgezeigt werden.

Die letzte Kategorie sind die Arbeitsplätze, einerseits in den Umschlagsbetrieben, aber auch bei HPA und HPC. Ein effizienter Hafen kann potenziell mehr Volumen umschlagen wird auch attraktiver für Logistikunternehmen. Das bedeutet, jedoch nicht, dass das Volumen auch wirklich umgeschlagen wird. Es ist eher so, dass gute und effiziente Planung zwar ein essentieller Bestandteil in dem Wachstum eines Hafens ist, jedoch noch viele weitere Faktoren eine Rolle spielen. Bezüglich der neuen Arbeitsplätze bei HPA und HPC, sind während des Projektes gab es zwar zeitlich begrenzte Stellen, jedoch keine dauerhafte Neubeschäftigung. Bei einer möglichen Weiterentwicklung zu einen Produkt, kann die Marke von fünf neuen Stellen aber definitiv erreicht werden.

## **5.2 Übersicht – Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Zur Umsetzung des Projekts waren in erster Linie Personalkosten geplant. Zusätzlich waren in geringem Umfang Reisekosten vorgesehen sowie vorhabenspezifische Abschreibungen.

HPC war maßgeblich für die Simulation und Erstellung des digitalen Zwillings des Hamburger Hafens zuständig. Für die Erstellung des digitalen Zwillings und die Simulation der Abläufe war die Beschaffung einer Simulations-Software im Rahmen des Projekts vorgesehen.

Im Laufe des Projekts hat sich allerdings herausgestellt, dass keine zusätzliche Lizenz für die Software beschaffen werden musste, da eine normalerweise anders genutzte Lizenz im Projekt zur Verfügung stand, was zur Zeit der Antragstellung für das Förderprojekt nicht abzusehen war.

Die Lizenzkosten waren im Projekt unter der Kostenposition 0847 Abschreibung aufgenommen. Gemäß Vorkalkulation ergaben sich für die Abschreibung der Software also Kosten. Diese Kosten fielen jedoch nicht an, da HPC die vorhandene Software-Lizenz für die Projektarbeit nutzen konnte.

Ferner waren in der Vorkalkulation Reisekosten kalkuliert. Geplant waren der Besuch der TL München im Jahre 2023 und 2025 sowie der Besuch der TOC in Rotterdam im Jahre 2024.

Jedoch hat HPC für das Projekt lediglich die TOC in Rotterdam im Sommer 2024 besucht. Die TransportLogistik in München in 2025 liegt außerhalb des Projektzeitraums und kann daher nicht besucht werden, die TransportLogistik im Jahre 2023 ist nicht für das Projekt besucht worden, da die initiale Projektvorstellung vom Verbundkoordinator, der HPA, wahrgenommen wurde.

Den größten Anteil an den Kosten nahmen die Personalkosten ein. Diese wurden vollständig wie zur Zeit der Antragstellung ausgeschöpft und für die Arbeit an den oben dargestellten Arbeitspaketen eingesetzt.

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

Das Interesse an Digitalen Zwillingen ist bei vielen Betreibern von Häfen oder Terminals sehr groß. Ebenso auch an einer ganzheitlichen Planung vom gesamten Hafen, oder auch nur einzelner Areale. Hier hat HafenplanZen angesetzt. Es wurde ein Prototyp eines Tools entwickelt, welches die ganzheitliche Planung unterstützen und validieren soll. Der Prototyp zeigt, wie Hafenplaner der HPA

dieses Tool nutzen, um einen Plan umzusetzen aber auch, um die Planung vorzustellen. Insgesamt stellt sich das übergreifende Projektziel als hochaktuell, relevant und vielversprechend dar.

Zur Erreichung der Projektziele waren dabei die in Kapitel 4 dokumentierten Arbeiten notwendig und angemessen. Durch den im Rahmen des Projektes entwickelten Prototyp sind die Möglichkeiten einer ganzheitlichen Hafenplanung aufgezeigt worden. Die durchgeführten Forschungsarbeiten im Verbundprojekt sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren dabei notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag formulierten Planung entsprachen und alle wesentlichen im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet wurden. Es waren keine zusätzlichen Ressourcen für das Projekt notwendig.

Die erzielten Projektergebnisse waren nur durch die interdisziplinäre Zusammensetzung des Verbunds und in arbeitsteiliger, koordinierter Aufgabenwahrnehmung durch die Verbundpartner möglich.

## **5.4 Verwertbarkeit der Projektergebnisse**

Das Projekt hat mit der Entwicklung eines Prototyps für ein digitales Hafenplanungstool die Grundlage für eine moderne, integrierte und datenbasierte Hafenplanung geschaffen. Durch die Nutzung des digitalen Zwillings können Auswirkungen von Infrastrukturmaßnahmen auf Wasser-, Schienen- und Straßenverkehre sowie auf Umweltaspekte frühzeitig visualisiert und bewertet werden. Der Prototyp ermöglicht erstmals die Integration verschiedener Fachdisziplinen in einer gemeinsamen digitalen Umgebung und überwindet damit die bislang übliche sequenzielle und isolierte Arbeitsweise. Gleichzeitig wird die Zusammenarbeit zwischen den Fachbereichen gestärkt, die Kommunikation mit Stakeholdern erleichtert und datenbasierte Entscheidungsprozesse unterstützt.

### **5.4.1 Genereller Nutzen**

Der generelle Nutzen des Projekts liegt in der praktischen Anwendbarkeit des entwickelten Hafenplanungstools. Der Prototyp ermöglicht eine effiziente und nachvollziehbare Entscheidungsfindung für die strategische Hafenplanung, indem er die Auswirkungen verschiedener Infrastrukturmaßnahmen auf Verkehrsflüsse und Umweltaspekte frühzeitig sichtbar macht. Durch die modulare Architektur kann das Tool flexibel an unterschiedliche Hafenstandorte angepasst werden, insbesondere Container- und Stückgutterminals sowie kleinere bis mittlere Hafenareale.

Darüber hinaus wurde im Projekt überprüft, inwieweit die bestehende Simulationssoftware an externe Datenquellen und Tools angeschlossen werden kann. Der generische Aufbau bietet HPC die Möglichkeit, neben dem entwickelten Masterplanungstool auch die vorhandenen Stand-Alone Simulationsmodule zukünftig in ein extern bedienbares Framework einzubinden. Einen ersten Test hierzu gab es im Rahmen einer Bachelor-Abschlussarbeit, die sich mit dem Einlesen eines Marine-Terminals und dessen Parametern beschäftigte. Diese Flexibilität eröffnet die Möglichkeit, dass die Software in einer vereinfachten Version auch von Kunden genutzt werden könnte, ohne dass tiefgehende Fachkenntnisse erforderlich sind. Ebenso ist denkbar, die Simulation an Terminal Operating Systems (TOS) anzubinden, um Betriebsabläufe zu emulieren. Durch diese Anschlussfähigkeit wird die Nutzung der Software deutlich erweitert und es entsteht eine Grundlage für die Weiterentwicklung hin zu marktfähigen Produkten.

Neben der direkten Nutzung im Hafenbetrieb bietet das Hafenplanungstool Potenzial für die Übertragung auf weitere Anwendungsbereiche wie Flughäfen, große Bahnterminals, Industrie- und Produktionsanlagen sowie intermodale Logistikzentren. Durch die flexible Anpassbarkeit und die Integration in bestehende Systeme können neue Kundensegmente erschlossen werden, wodurch das Tool über den ursprünglichen Projektumfang hinaus wirtschaftlich nutzbar wird.

#### **5.4.2 Fortschreibung des Verwertungsplans**

Auf Basis der Projektergebnisse sind weitere Schritte erforderlich, um das Hafenplanungstool zu einer marktfähigen Lösung zu entwickeln. Dazu gehören die Erweiterung der Funktionalität um zusätzliche Fachmodule, die Skalierung der Simulationen für komplexere Szenarien, die Verbesserung der Datenintegration und Schnittstellenanbindung an operative Systeme sowie die Optimierung der Benutzeroberfläche auf Grundlage der gewonnenen Nutzungserfahrungen. Gleichzeitig könnte die Integration typischer Arbeitsabläufe der Hafenplanung in das Tool erfolgen, um eine produktive Nutzung zu erleichtern.

Nach Abschluss des Forschungsprojekts könnte eine erste nutzbare Version des Tools erstellt werden, die sowohl durch die HPA als auch durch ausgewählte Pilotkunden getestet werden kann. In einem weiteren Schritt könnte die Anwendung des Tools schrittweise auf weitere Kundensegmente ausgeweitet werden, beispielsweise auf Flughäfen, große Bahnterminals oder Industrie- und Logistikstandorte. Der modulare Aufbau des Tools ermöglicht dabei eine flexible Anpassung an unterschiedliche Infrastrukturszenarien und könnte die Grundlage für eine schrittweise Einführung auf dem Markt bilden.

Darüber hinaus bieten die Projektergebnisse Ansatzpunkte für innovative Weiterentwicklungen. Dazu zählen unter anderem die Optimierung von

Verkehrsflüssen und Betriebsabläufen durch Simulationen, die Integration von Echtzeitdaten in digitale Zwillinge, die Verbindung mit weiteren digitalen Planungswerkzeugen sowie die kontinuierliche Verbesserung der Visualisierung komplexer Infrastrukturszenarien. Diese Weiterentwicklungen könnten die Einsatzmöglichkeiten des Tools erweitern und die Grundlage für die Übertragung auf neue Kundensegmente schaffen.

## 5.5 Relevante thematische Fortschritte durch Dritte

In den Jahren der Projektlaufzeit von HafenplanZen hat sich im Bereich der Digitalen Zwillinge einiges getan. Ein ebenfalls durch das IHATEC-Programm gefördertes Forschungsprojekt ist TwinSim, das zeigt, wie ein Digitaler Zwilling zur Optimierung von betrieblichen Abläufen innerhalb eines Terminals eingesetzt werden kann.

Das Ingenieurbüro Moffatt & Nichol ist hier bereits einen Schritt weiter gegangen und hat zwei Digitale Zwillinge auf den Markt gebracht. Eines dieser Produkte verfolgt ein ähnliches Ziel wie TwinSim und dient der Effizienzsteigerung und Ablaufoptimierung im Terminalbetrieb. Darüber hinaus bietet das Unternehmen jedoch auch die Möglichkeit, einen kompletten Hafen digital abzubilden und so sämtliche Infrastrukturen und Prozesse auf einer einheitlichen Plattform zu modellieren und zu überwachen.

Was all diese Digitalen Zwillinge verbindet, ist die digitale Abbildung des aktuellen, realen Zustands. Genau hier setzt HafenplanZen einen anderen Schwerpunkt: Ziel dieses Projekts ist es, eine digitale Vision der künftigen Hafengestaltung zu entwickeln und damit die strategische Planung für den Hafen der Zukunft zu unterstützen. Ein vergleichbares Produkt, das sich explizit auf die digitale Abbildung und Visualisierung zukünftiger Hafenkonzeppte fokussiert, existiert nach aktuellem Kenntnisstand nicht.

## 5.6 Durchgeführte und geplante Veröffentlichungen

Während der Projektlaufzeit wurden einige Publikationen, Vorträge und Veröffentlichungen sowie Konferenzbesuche vorgenommen. Zudem haben mehrere Studierende im Rahmen des Projektes ihre Abschlussarbeiten schreiben können. Die erfolgten Beiträge zur Öffentlichkeitsarbeit sind unten aufgelistet:

### Publikationen

- [1] Hertel, J., Goodarzi, S., & Steinicke, F. (2024, October). Adaptive Immersion: Mixed Reality Map Visualization with Gradual Transition. In

*Proceedings of the 2024 ACM Symposium on Spatial User Interaction* (pp. 1-2). doi: [10.1145/3677386.3688874](https://doi.org/10.1145/3677386.3688874).

- [2] Hertel, J., Synwoldt, J. N., & Steinicke, F. (2025, March). Investigating the Effects of Limited Field of View and Resolution in Optical See-Through Augmented Reality in the Context of Immersive Analytics. In *2025 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)* (pp. 1240-1241). doi: [10.1109/VRW66409.2025.00266](https://doi.org/10.1109/VRW66409.2025.00266)
- [3] Hertel, J., Steinicke, F. (2025). Development and Evaluation of a Collaborative Touch Table Port Planning Support System. (Unter Begutachtung)
- [4] Steinicke, F. (2025). Mixed Reality in der Verwaltung der Stadt Hamburg. Vortrag in der Runde Digitalisierung II/2025
- [5] Fabrin, B.H.P., Brüggemann, W. (2025). Minimization of Vehicle Delay Time in a Port Area by Optimizing Traffic Light Control Using Simulation Optimization. Eingereicht bei Transportation Research Record.

#### **Vorträge und Teilnahme an Konferenzen**

- Präsentation auf der OR Conference 2023 in Hamburg
- Präsentation auf der LDIC 2024 in Bremen
- Präsentation auf der OR Conference 2024 in München
- Demopräsentation beim ACM Symposium on Spatial User Interaction (SUI) 2024 (Publikation [1])
- (Projekt-) Präsentation auf der EURO Conference 2024 in Kopenhagen
- Posterpräsentation auf der IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR) 2025 (Publikation [2])
- Demopräsentation beim VR/AR Workshop der Gesellschaft für Informatik 2024
- Geplant: Präsentation auf der Konferenz Mensch und Computer (MuC) 2025 (Publikation [3])
- Teilnahme und Vortrag bei der Plant User Conference 2024 – Titel: „Planning and simulation of ports and terminals using Digital Triplets“

- Vortrag und Demovorstellung in der Runde Digitalisierung II/2025 (Publikation [4])
- Präsentation auf der OR Conference 2025 in Bielefeld

### **Weitere Öffentlichkeitsarbeit und Nachwuchsförderung**

- Demo beim Girl's Day 2024 und 2025
- Demo bei mint:pink 2025

### **Studentische Abschlussarbeiten**

- Evaluierung einer Taxonomie für die Anordnung von Benutzeroberflächen-Elementen in einem kombinierten Touchtisch-Augmented-Reality-Setting (Bachelorarbeit)
- Untersuchung von intuitiven Interaktionsmöglichkeiten zur Geländemodellierung in Augmented Reality (Bachelorarbeit)
- Investigating the Effects of Limited Field of View and Resolution in Optical See-Through Augmented Reality in the Context of Immersive Analytics (Masterarbeit)
- User Interactions on Multi-Touch Surfaces: Effects of Adjustable Tilt and Height (Masterarbeit)

## **5.7 Quantitative und/oder qualitative Effekte des Projektes**

### **Input (Aufwand/Ressourceneinsatz)**

Das Projekt erstreckte sich über 30 Monate, in denen insgesamt 34 Personenmonate eingesetzt wurden. Diese wurden zu 46 % durch eine Förderung des Bundes und zu 54 % aus Eigenmitteln finanziert. In diesen 34 Personenmonaten brachte das Team als Projektpartner das fachliche Know-how in den Bereichen Simulation und Hafenplanung ein und nutzte die relevanten Hafen- und Logistikdaten. Auf dieser Grundlage wurden die Module des digitalen Hafenmasterplanungstools konzipiert, integriert und die Schnittstellen aufgebaut, sodass die Funktionsfähigkeit des Prototyps gewährleistet war und die späteren Simulationen validiert werden konnten.

### **Output (direkte Projektergebnisse)**

Es wurde ein funktionierender Prototyp eines digitalen Hafenmasterplanungstools entwickelt, der bereits heute durch die Implementierung der Simulation ein

Alleinstellungsmerkmal besitzt. Der Prototyp demonstriert, wie die Anbindung relevanter Hafen- und Logistikdaten an das Planungstool erfolgen kann und wie die Kommunikation zwischen den einzelnen Modulen des Systems gestaltet werden könnte. Die Ergebnisse der Simulation wurden mit realen Daten validiert, wodurch gezeigt werden konnte, dass der Prototyp erste Verkehrsengpässe im Fallbeispiel zuverlässig identifizieren kann. Damit liefert der Prototyp bereits konkrete, nachvollziehbare Ergebnisse, die das Zusammenspiel der Systeme aufzeigen. Der Hauptnutzen liegt vor allem bei den direkten Projektpartnern, da sie lernen konnten, wie die einzelnen Komponenten effektiv zusammenarbeiten könnten und welche Potenziale für zukünftige Anwendungen bestehen.

### **Outcome (mittelfristige Wirkungen)**

Der Prototyp zeigt bereits jetzt, wie Planungsprozesse in der Hafenentwicklung effizienter gestaltet werden könnten. Erste Tests verdeutlichen, dass unterschiedliche Szenarien deutlich schneller erstellt und miteinander verglichen werden können, wodurch sich die Planungsdauer potenziell um bis zu 50 Prozent verkürzen lässt. Infrastrukturmaßnahmen lassen sich frühzeitig modellbasiert prüfen, sodass nachträgliche Anpassungen seltener erforderlich sein könnten. Für die potenziellen Nutzergruppen – Hafenbehörden, Terminalbetreiber, kommunale Entscheidungsträger und Logistikunternehmen – bietet der Prototyp eine wertvolle Grundlage, um Entscheidungen besser abzusichern und Planungsprozesse effizienter zu gestalten. Außerdem deutet der Prototyp darauf hin, dass die Simulation eine transparente Basis für Abstimmungen zwischen verschiedenen Akteuren schaffen kann, wodurch die Zusammenarbeit erleichtert und Konfliktpotenziale frühzeitig erkannt werden könnten.

### **Impact (langfristige Wirkungen)**

Langfristig verdeutlicht der Prototyp das Potenzial eines fertigen digitalen Hafenmasterplanungstools, die Effizienz und Nachhaltigkeit der Hafenentwicklung deutlich zu erhöhen. Durch gezieltere Planung könnten Investitionen künftig besser ausgerichtet und Fehlinvestitionen vermieden werden, was für die Hafenwirtschaft erhebliche finanzielle Einsparungen ermöglichen würde. Zudem lassen sich Flächen ressourcenschonender nutzen und Verkehrsströme optimieren, was die Emission von CO<sub>2</sub> und anderen Schadstoffen verringern könnte und damit zu einer messbaren ökologischen Entlastung beiträgt. Die transparente Simulationsumgebung schafft darüber hinaus die Grundlage für nachvollziehbare Entscheidungen und eine verbesserte Zusammenarbeit zwischen Hafenbehörden, Betreibern, Logistikunternehmen und Kommunen, wodurch die gesellschaftliche Akzeptanz von Infrastrukturprojekten steigen könnte. Insgesamt zeigt der Prototyp damit, welches Potenzial ein fertiges Produkt entfalten könnte, um die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Häfen zu sichern und

gleichzeitig ökologische sowie gesellschaftliche Verantwortung sichtbar wahrzunehmen.

## **5.8 Bestätigung der Anreizwirkung**

### **Erhöhung des Projektumfangs in Bezug auf Gesamtkosten und Mitarbeiter**

Die Förderung hat es ermöglicht, den Projektumfang im Vergleich zu einem Szenario ohne Förderung deutlich zu erhöhen. Dank der finanziellen Unterstützung konnten die Anwendungsszenarien umfassend gewählt, realitätsnah definiert und detailliert beschrieben werden. Die eingesetzten Technologien konnten so implementiert werden, dass die Anwender aus der Strategieabteilung der HPA sowie weitere Beteiligte die Mehrwerte direkt am Prototyp erleben und bewerten konnten.

Darüber hinaus wurde die Anzahl der eingesetzten FTE in der Entwicklung erhöht, wodurch die Umsetzung des erweiterten Projektumfangs möglich wurde. Insgesamt konnte durch die Förderung das ursprüngliche Ziel, die Potenziale eines digitalen Masterplanungstools für die strategische Hafenplanung aufzuzeigen und praxisnah zu demonstrieren, deutlich besser erreicht werden als ohne Förderung.

### **Beschleunigung des Vorhabens**

Die Förderung hat wesentlich dazu beigetragen, das Vorhaben zeitlich zu beschleunigen. Ohne Förderung hätten HPA und HPC das Forschungsprojekt mit einem stark reduzierten Scope umgesetzt, wobei der zeitliche Aufwand annähernd gleichgeblieben wäre. Erst nach Abschluss dieser initialen Phase wäre eine zweite Phase mit einem umfassenden, realistischen Anwendungsszenario und der vollständigen Nutzung der Technologien möglich gewesen, die nach aktuellen Schätzungen weitere 30 Monate in Anspruch genommen hätte – unter der Voraussetzung, dass das entsprechende Forschungsbudget dann zur Verfügung gestanden hätte.

Dank der Förderung konnte das Projekt so gestaltet werden, dass die Möglichkeiten eines digitalen Hafenmasterplantools innerhalb von 30 Monaten demonstriert werden konnten, anstatt über einen Zeitraum von 60 Monaten. Die Ergebnisse lagen bereits nach der Hälfte der ursprünglich vorgesehenen Projektzeit vor, wodurch die Nutzung der Potenziale des Tools der HPA und HPC deutlich früher erfolgen konnte.

---

## 6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

---

Im Rahmen des Forschungsprojekts "HafenplanZen" wurde in dem knapp zweieinhalbjährigen Verlauf von November 2022 bis April 2025 erfolgreich ein innovativer Prototyp eines digitalen Hafenmasterplanungstools entwickelt und anhand einer konkreten Fallstudie im Hamburger Hafen validiert. Diese Entwicklung zeigt das erhebliche Potential, das in der Digitalisierung und ganzheitlichen Betrachtung der strategischen Hafenplanung liegt.

### Zentrale Ergebnisse des Projekts

Der im Rahmen des Projekts entwickelte Prototyp integriert erstmals verschiedene Fachdisziplinen der Hafenplanung in einer gemeinsamen digitalen Umgebung und überwindet damit die bislang übliche sequenzielle und isolierte Arbeitsweise. Durch den Einsatz des digitalen Zwillings können die Auswirkungen von Infrastrukturmaßnahmen auf Wasser-, Schienen- und Straßenverkehre sowie auf Umweltaspekte frühzeitig visualisiert und bewertet werden.

Das entwickelte Tool basiert auf mehreren Kernfunktionen. Eine interaktive 3D-Visualisierung ermöglicht die Bedienung über einen Touchtisch und optional über AR-Erweiterungen. Ergänzt wird dies durch ein Verkehrssimulationsmodul, das die Auswirkungen von Planungsszenarien auf Verkehrsflüsse realitätsnah abbildet, ein Optimierungsmodul zur Verbesserung von Ampelschaltungen und Verkehrsabläufen sowie ein Emissionsberechnungsmodul zur Bewertung der Umweltauswirkungen.

Die Fallstudie am Beispiel des Areals Steinwerder Süd zeigte, dass mit dem Tool verschiedene Entwicklungsszenarien, wie etwa Logistikpark, Multi-Operator-Terminal oder Industrieansiedlung, effizient durchgespielt und deren verkehrliche sowie infrastrukturelle Auswirkungen analysiert werden können. Dies ermöglicht eine fundierte und nachvollziehbare Entscheidungsfindung, die zuvor nur mit erheblichem Aufwand realisierbar war.

### Transferpotenzial

Die Analysen des Projekts haben ein vielfältiges Transferpotenzial des Ansatzes aufgezeigt. Dank der modularen Architektur des Tools kann es flexibel an unterschiedliche Anforderungen und Anwendungsfälle angepasst werden. Die Übertragbarkeit auf andere Hafenstandorte ist grundsätzlich möglich, insbesondere für Container- und Stückgutterminals sowie für kleinere bis mittlere Hafensysteme. Komplexere Szenarien, wie Häfen mit Schleusen oder die Simulation ganzer Hafensysteme, erfordern allerdings zusätzliche Entwicklungsarbeiten.

Auch für die Logistikbranche ergeben sich Anwendungsmöglichkeiten, da Industrie- und Logistikstandorte strukturell ähnlich zu Hafenterminals aufgebaut sind. Entsprechend können die Planungen von Logistikzentren, Industrieanlagen oder intermodalen Terminals mit vergleichbaren Methoden durchgeführt werden. Darüber hinaus sind auch weitere Anwendungsfelder denkbar, etwa die Planung von Flughafeninfrastrukturen, die Entwicklung großer Bahnterminals, die Gestaltung von Produktions- und Fabrikanlagen, die Stadtentwicklung und Verkehrsplanung in urbanen Räumen sowie die Planung von Logistikflächen im Hinterland.

### **Feedback und Anforderungen der Nutzerinnen und Nutzer**

Workshops und Fokusgruppengespräche im Rahmen der Fallstudie zeigten ein überwiegend positives Feedback zum Grundkonzept. Besonders hervorgehoben wurde das Potenzial zur verbesserten interdisziplinären Zusammenarbeit und die anschaulichere Kommunikation von Planungsvarianten gegenüber Stakeholdern und der Öffentlichkeit. Eine zentrale Anforderung der Anwenderinnen und Anwender war die Integration von Import- und Exportfunktionen zu bestehenden Fachplanungstools, damit Daten aus spezialisierten Werkzeugen wie CAD-Plänen, GIS-Daten oder Verkehrsmodellen nahtlos übernommen und die Simulationsergebnisse zurückgeführt werden können.

Während die 3D-Visualisierung als klarer Mehrwert wahrgenommen wurde, betonten die Nutzerinnen und Nutzer zugleich die Notwendigkeit, diese mit detaillierten numerischen Daten zu ergänzen. Für präzise ingenieurtechnische Planungen sind exakte Angaben zu Höhen, Tiefen, Distanzen und Kapazitäten unverzichtbar.

### **Vom Prototyp zum Produkt**

Der entwickelte Demonstrator hat das Konzept eines integrierten Hafenplanungstools erfolgreich validiert. Für eine produktive Nutzung sind jedoch weitere Entwicklungsschritte notwendig, darunter die Erweiterung der Funktionalität um zusätzliche Fachmodule, die Skalierung der Simulationen für komplexere Szenarien, die Verbesserung der Datenintegration durch zusätzliche Schnittstellen zu Fachsystemen und operativen Datenquellen, die Professionalisierung der Benutzeroberfläche auf Basis der Nutzungserfahrungen sowie die Implementierung typischer Arbeitsabläufe der Hafenplanung.

### **Digitale Zwillinge als Grundlage moderner Zusammenarbeit**

Das Projekt „HafenplanZen“ hat gezeigt, dass digitale Zwillinge ein vielversprechendes Fundament für die fachübergreifende Zusammenarbeit in der Hafenplanung bieten. Sie ermöglichen ganzheitliche Betrachtungen von

Verkehrsflüssen, Umweltauswirkungen und Flächennutzung, schaffen transparente Entscheidungsgrundlagen und verbessern die Kommunikation mit Stakeholdern sowie der Öffentlichkeit. Gleichzeitig unterstützen sie datenbasierte Planungsprozesse und agile Reaktionen auf veränderte Rahmenbedingungen.

Angesichts der aktuellen Herausforderungen für Häfen, von der Energiewende über veränderte Logistikketten bis hin zu klimatischen Veränderungen, stellen digitale Werkzeuge wie das entwickelte Hafenplanungstool eine wichtige Unterstützung für zukunftssichere Entscheidungen dar. Sie ermöglichen ganzheitliche Betrachtungen von Verkehrsflüssen, Umweltauswirkungen und Flächennutzung, schaffen transparente Entscheidungsgrundlagen und verbessern die Kommunikation mit Stakeholdern sowie der Öffentlichkeit. Gleichzeitig unterstützen sie datenbasierte Planungsprozesse und eine agile Reaktion auf veränderte Rahmenbedingungen. Die Umsetzung des Projekts stellt einen ersten wichtigen Schritt in Richtung einer vollständig digitalisierten strategischen Hafenplanung dar und trägt damit zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher Häfen bei.