
Verbundprojekt ANITA – Autonome Innovation im Terminalablauf

Automatisiertes Fahren von LKW im realen Logistikbetrieb



Gemeinsamer Schlussbericht

Förderkennzeichen 19A20006

MAN Truck & Bus SE 19A20006 A

DB Intermodal Services GmbH 19A20006 B

Deutsche Umschlaggesellschaft Schiene – Straße mbH 19A20006 C

Götting KG 19A20006 D

Hochschule Fresenius 19A20006 E

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Autoren¹

Name	Organisation
Amélie Jacquemart-Purson	MAN Truck and Bus SE
Prof. Dr. Christian T. Haas	Hochschule Fresenius
Dr. Dustin Schöder	Deutsche Bahn AG
Nils Kluge	Götting KG

Weitere Autoren

Name	Organisation
Oliver Gebauer	MAN Truck and Bus SE
Veronika Harsandi	MAN Truck and Bus SE
Stefan Jürgens	MAN Truck and Bus SE
Fabian Kутtenreich	MAN Truck and Bus SE
Lars Lippert	MAN Truck and Bus SE
Peter Strauss	MAN Truck and Bus SE
Sonja Troberg	MAN Truck and Bus SE
Christiane Wölfel	MAN Truck and Bus SE
Leonie Wulf	MAN Truck and Bus SE
Dr. Patric Schubert	Hochschule Fresenius
Marius Lau	Hochschule Fresenius
Michael Fritz	Hochschule Fresenius
Anne-Marie Gemmerich	Hochschule Fresenius
Thomas Wunsch	Deutsche Umschlaggesellschaft Schiene-Straße
Jens Präse	DB Intermodal Services
Mikkel Thomsen	Deon Digital
Bjørn Bugge Grathwohl, PhD	Deon Digital
Iris Lüpkes	AlbrechtConsult GmbH

Die ANITA-Projektpartner danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für die finanzielle Förderung des Verbundprojekts sowie dem Projektträger TÜV Rheinland für die Betreuung während der Projektlaufzeit.

¹ Ausschließlich zum Zweck der besseren Lesbarkeit wird auf eine geschlechterspezifische Schreibweise sowie auf eine Mehrfachbezeichnung verzichtet. Alle Personenbezeichnungen sollen dennoch als geschlechtsneutral angesehen werden.

Inhalt

Inhalt	3
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis	11
1 Projektüberblick und Einführung in den Bericht	14
1.1 Aufgabenstellung	14
1.2 Voraussetzungen	14
1.2.1 Industriepolitische Ausgangslage	14
1.2.2 Allgemeine Herausforderungen	15
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	16
1.3.1 Projektstruktur	16
1.3.2 Arbeitspakete und Verantwortlichkeiten	17
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn	18
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	21
2 System – Kommunikation – Simulation (Hochschule Fresenius; AP 1, AP 3, AP 5, AP 6)	23
2.1 Systemanalyse, Regelwerkentwicklung und Missionsplanung I	23
2.1.1 Ausgangslage	23
2.1.2 Arbeitsschritte	23
2.1.3 Ergebnisse	24
2.2 Validierung der Regelwerke und Missionsplanung II	29
2.3 Entwicklung des digitalen Kommunikationssystems und Missionsplanung III	38
2.4 Testung des digitalen Kommunikationssystems und der Missionsplanung	45
2.5 Systemsimulationen und Transformation	47
2.5.1 Einführung	47
2.5.2 Simulationen in der Testumgebung I – kontinuierliche Modelle	49
2.5.3 Simulationen in der Testumgebung II – diskrete Modelle	61
2.5.4 Simulationen in der Testumgebung III – Deontische Operatoren	65
2.6 Lessons Learned	70
3 Fahrzeugentwicklung (MAN Truck & Bus SE, Götting KG)	72
3.1 Konzeption von Fahrzeug und Software (AP 2.1)	72
3.1.1 Konzeption der Fahrzeugarchitektur (AP 2.1.1)	72
3.1.2 Konzeption der Softwarearchitektur (AP 2.1.2)	73

3.2 Fahrzeugaufbau (AP 2.2)	74
3.2.1 Integration (AP 2.2.1)	74
3.2.2 Komponententest (AP 2.2.2)	75
3.3 Funktionsentwicklung (AP 2.3)	76
3.3.1 Sensorik und Perzeption (AP 2.3.1)	76
3.3.2 Bewegungsplaner (AP 2.3.2)	85
3.3.3 Motion Control (AP 2.3.3)	86
3.3.4 Mensch-Maschine-Schnittstelle (AP 2.3.4)	90
3.3.5 V2X-Kommunikation (AP 2.3.5)	96
3.4 Lokalisation von Sattelaufliegern (AP 2.4)	97
3.4.1 Funktionales Konzept	97
3.4.2 Entwicklung mittels Aufzeichnungen realer Trailer-Anfahrten	97
3.4.3 Steigerung der Robustheit	98
3.4.4 Stabilisierung des Suchbereichs mittels Odometriedaten	99
3.4.5 Identifizierung eines bodenparallelen Höhenbands aus Sensordaten	100
3.5 Erkennung von Hindernissen (AP 2.5)	101
3.5.1 Funktionales Konzept	101
3.5.2 Aufbau der Hinderniserkennung	102
3.5.3 Teilbereich Fahrschlauchidentifizierung	102
3.5.4 Teilbereich Hinderniserkennung	104
3.5.5 Filterung der Punktwolke	104
4 Durchführung der Testfahrten und des Pilotbetriebs (Deutsche Bahn AG)	107
4.1 Erprobung und Optimierung des Fahrzeugs (AP 4.1)	107
4.2 Testphase (AP 4.2) und Pilotbetrieb (AP 4.3)	107
4.3 Auswertung und Ausblick (AP 4.4)	110
4.4 Lessons Learned	112
5 Projektmanagement	114
5.1 Konsortialprojektmanagement (MAN Truck & Bus; AP 7.1)	114
5.1.1 Verantwortlichkeiten der Projektpartner	115
5.1.2 Zentrale Dokumentenablage	120
5.1.3 Gremien	121
6 Projektkommunikation und Öffentlichkeitsarbeit (Deutsche Bahn AG)	123
6.1 Projekt-interne Kommunikation	123
6.2 Kommunikation von (Zwischen-) Ergebnissen im Rahmen von Vorträgen und Präsentationen	123
7 Fazit der Projektpartner	125
7.1 Nachbereitung / Retrospektive	125

7.2	Take Home Message	128
7.3	Zusammenfassung	129
	Literaturverzeichnis	131

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Projektstruktur ANITA.	17
Abbildung 2:	Netzplan Arbeitspakete ANITA.	17
Abbildung 3:	Schematische Darstellung des Ist-Standes, der im vorliegenden Fall in die Prozesse „Ankommen am Terminal bzw. Depot und Anmeldung“ (links) sowie „Verladung und Verlassen“ (rechts) differenziert wurde. Die (horizontalen) Layer in den Modellen stellen die Agenten dar.	29
Abbildung 4:	BPMN-Schema der physischen Prozesse und der Informationsübertragung bei vier Teilen des Umfuhrprozesses mit integriertem DKS.	34
Abbildung 5:	Ablaufschema des Zielprozesses in BPMN. Kommunikation zwischen Broker, Truck und den Terminal Operation Systems (COSI und BLU).	35
Abbildung 6:	Schematische Darstellung des Brokers (DKS) und der Kommunikation mit den weiteren Agenten und Endpoints.	40
Abbildung 7:	Darstellung eines Teils des Kommunikationsprozesses während der Umfuhr.	41
Abbildung 8:	Frontend für die Dateneingabe der Mission.	45
Abbildung 9:	Auszug der Prozessschritte im DKS.	46
Abbildung 10:	Terminalverkehre zwischen Depotterminal der DBIS (blau) und Intermodalterminal der DUSS (hellrot).	50
Abbildung 11:	Oben: Draufsichtskarte der beiden Containerterminals. Unten: Implementierung des Netzwerkes möglicher Fahrwege.	52
Abbildung 12:	Darstellung der individuellen Dynamiken der Fahrzeuge	54
Abbildung 13:	Darstellung zeigt den schematischen Ablauf (braunes Fahrzeug) der Einfahrt (oben), des Checkings und der Registrierung (Mitte) und der Verladung (unten)	55
Abbildung 14:	Exemplarische Dynamik innerhalb des DBIS-Terminals bei hoher Auslastung.	56
Abbildung 15:	Exemplarische Darstellung der Dynamik innerhalb des DUSS-Terminals mit Kran Interaktion.	58
Abbildung 16:	Boxplot der Fahrzeugreisezeiten auf dem Terminalgelände der DUSS in Ulm.	61
Abbildung 17:	Graphisches Userinterface zum Einstellen der Ressourcen.	62
Abbildung 18:	Auslastungen der DUSS in Ulm (nur Umschläge mit Fahrzeugbeteiligung) auf der Basis von historischen Daten, aufgeteilt nach Wochentag.	63

Abbildung 19:	In diesem Szenario ist der Verlauf der Wartezeiten im Normalfall von 2 Checkern, 4 Anmeldeschaltern und 3 Kränen zu sehen. _____	64
Abbildung 20:	Dieses Szenario zeigt den exemplarischen Verlauf bei dem Wegfall von einem Anmeldeschalter. Die Anzahl der Checker (2) und der Kräne (4) entspricht dem Normalfall. _____	64
Abbildung 21:	In diesem Szenario wurde die Anzahl der Checker von 2 auf 1 reduziert. Die Anzahl der Anmeldeschalter (4) und Kräne (3) entspricht dem Normalfall. _____	65
Abbildung 22:	In diesem Szenario wurde die Anzahl der Verlademöglichkeiten auf 1 Kran reduziert. Die Anzahl der Checker (2) und Anmeldeschalter (4) entspricht dem Standard. _____	65
Abbildung 23:	Auszug aus der Verkehrssimulation mit dem Einstellen der Parameter. _	68
Abbildung 24:	Angepasster Innenraum des Fahrzeugs. _____	74
Abbildung 25:	Chassis und Container bei einer Messfahrt im DUSS-Terminal. _____	75
Abbildung 26:	Funktionale Module des automatisieren Systems. _____	76
Abbildung 27:	Links: Normale Ansicht. Rechts: Zugehörige Simulation. _____	77
Abbildung 28:	Zeitliche Synchronisierung der verbauten Lidarsensoren. Farbcodiert ist die Zeitdifferenz. _____	77
Abbildung 29:	Visualisierung der Punktwolke. _____	78
Abbildung 30:	Links: Simulierte Punktwolken von Lidar-Sensoren mit eingeblendeter physischer Umgebung. Rechts: Ohne eingeblendeter physischer Umgebung. _____	78
Abbildung 31:	Links: Der mit Markern bestückte Versuchsträger. Rechts: Die daraus erzeugte dreidimensionale Punktwolke. _____	79
Abbildung 32:	Oben: Unkalibriertes Lidar-System am Versuchsträger. Unten: Kalibriertes Lidar-System. _____	80
Abbildung 33:	Links: Messfahrzeug im DBIS-Depot Ulm. Rechts: MAN-Teststrecke in München. _____	81
Abbildung 34:	Karte des DBIS-Depots. _____	81
Abbildung 35:	Graphenbasierte Lokalisierung. Karte (blau); zur Karte zugeordnete Landmarken (grün); Landmarkenmessungen (grau, orange und rot). ____	82
Abbildung 36:	Links: Bild einer am Versuchsträger verbauten Kamera. Rechts: Punktwolke der Lidare. _____	83
Abbildung 37:	Visualisierung der fusionierten SPS-Punktwolke. Links: farbkodierte Geschwindigkeit. Rechts: semantische Segmentierung. _____	83

Abbildung 38:	Links: Semantische Segmentierung des ursprünglichen Netzes. Rechts: Output nach dem Training. _____	85
Abbildung 39:	Funktionskomponenten (rot) im Gesamtsystemkontext. _____	87
Abbildung 40:	Phasen des Vorgangs zum automatisierten Auf- und Absatteln. _____	89
Abbildung 41:	Links: Bereiche zur Positionierung der Leuchtelemente. Rechts: Aufbau des externen HMI-Konzepts. _____	91
Abbildung 42:	State-Chart des externen HMI-Detailkonzepts. _____	92
Abbildung 43:	Links: Anzeige „Automation an“ im Cluster. Rechts: Anzeige „Automation aus“. _____	93
Abbildung 44:	Links: Hinweis zur Wiederanfahrt: „Zum Anfahren Fahrpedal betätigen“. Mitte-Links: Stoppwarnung, wenn Twistlocks geöffnet sind: „Anfahren nicht möglich“. Mitte-Rechts: Kollisionswarnung bei einer Nahhinderniserkennung. Rechts: Anzeige, wenn der Not-Aus gedrückt ist. _____	93
Abbildung 45:	Links: Warnhinweis auf Schildern und Schulungsunterlagen. Rechts: Warnhinweis zur Anbringung am Fahrzeug. _____	94
Abbildung 46:	Schnittstellendesign (DDS, Message Queuing Telemetry Transport – MQTT). _____	96
Abbildung 47:	Lokalisierung über Stützbeine. _____	97
Abbildung 48:	Ausreißer aufgrund störender Anbauteile (obere Punktwolke). _____	98
Abbildung 49:	Situation bei ausgebliebener Detektion ohne Odometrienutzung. _____	99
Abbildung 50:	Zwischen den Scanebenen liegendes Objekt. _____	100
Abbildung 51:	Sensorparalleles Höhenband vor und nach Neigung des Chassis. _____	100
Abbildung 52:	Umgebungsaufnahme des Laserscanners verglichen mit einem Foto. _____	101
Abbildung 53:	Bestandteile der Hinderniserkennung. _____	102
Abbildung 54:	Umgebungswahrnehmung der Hinderniserkennung. _____	103
Abbildung 55:	Vergleich des überprüften Bereichs zwischen schneller Geradeausfahrt und langsamer Kurvenfahrt. _____	104
Abbildung 56:	Scheinobjekt aufgrund von Reflexionen an der Fahrzeugseite. _____	105
Abbildung 57:	Berücksichtigte Bereiche je Scanner. _____	105
Abbildung 58:	Miteinbezug des Trailers (blau) in Hinderniserkennung. Unten im Bild: parkende LKW. _____	106
Abbildung 59:	Mittlere Umlaufzeiten (Median) für Umfahren klassischer LKW und autonomer LKW. _____	110

Abbildung 60: Demostart bei der Abschlusspräsentation. _____	114
Abbildung 61: ANITA SharePoint. _____	121

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Verantwortlichkeiten in den AP _____	18
Tabelle 2:	Darstellung der Systemagenten und deren Cluster-Zugehörigkeit, Hinweis: mit ** markierte Agenten sind nicht typisch für die Testinfrastruktur in Ulm. _____	25
Tabelle 3:	Simulationsparameter zur Einstellung von Randparametern _____	59
Tabelle 4:	Auswahl von Veranstaltungen _____	123

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Abstandsregeltempomat (Adaptive Cruise Control)
ADMA	Automotive Dynamic Motion Analyzer
AG	Aktiengesellschaft
AGX	Autonomous GPU Acceleration
ANITA	Autonome Innovation im Terminalablauf
AP	Arbeitspaket
ATV	Automated Guided Vehicle
AWS	Amazon Web Service
BGHW	Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik
BLU	Betriebsleitsystem für Umschlagbahnhöfe und Terminals im Kombinierten Verkehr
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BPMN	Business Process Model and Notation
C	Container
CAD	Computer Aided Design
CAN	Controller Area Network
cm	Zentimeter
COSI	Container Steuerung Information (Depot Steuerungssystem)
CPU	Central Processing Unit
CSL	Contract Specification Language
CT	Container-Terminal
DB AG	Deutsche Bahn AG
DBIS	DB Intermodal Services
DC	Gleichstrom (direct current)
DDS	Data Distribution Service
DIN	Deutsche Industrie-Norm
div.	divers
DKS	Digitales-Kommunikations-System
DUSS	Deutsche Umschlaggesellschaft Schiene-Straße mbH
E	Kantenmenge (Edges)
EN	Europäische Norm
FE	Forschung und Entwicklung
FFFO	Fail Fast Fail Often
FIFO	First-in-first-out
FTF	Fahrerlose Transportfahrzeuge

FTS	Fahrerlose Transportsysteme
GPU	Graphics Processing Unit
h	Stunde
H2M	Human to Machine
HARA	Hazard and Risk Analysis
H2H	Human to Human
HHLA	Hamburger Hafen und Logistik Aktiengesellschaft
HMI	Human Machine Interface
HOLM	House of Logistics an Mobility
HS	Hochschule
ID	Identifier
IDM	Intelligent-Driver-Model
IM	Intermodal Terminal
ISO	Internationale Organisation für Standardisierung
IT	Information Technology
K	Kunde
KKS	Komfort-Kupplungs-System
km	Kilometer
KPI	Key Performance Indicator
KV	Kombinierter Verkehr
LED	Light Emitting Diode
LKW	Lastkraftwagen
LTE	Long Term Evolution
MAN	MAN Truck & Bus SE
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
Nfz	Nutzfahrzeug
PKW	Personenkraftwagen
PMD	Photomischdetektor
PPT	Pasir Panjang Terminals
Prof.	Professor
PTP	Precision Time Protocol
rd.	rund
REST	Representation State Transfer (Schnittstelle)
RS	Reachstacker
s	Sekunde
SIL	Safety Integrity Level

SOAP	Simple Object Access Protocol
StVO	Straßenverkehrs-Ordnung
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
TCO	Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership)
TOS	Terminal-Operation-System
TÜV	Technischer Überwachungsverein
V	Knotenmenge (Vertices)
V2X	Vehicle to Everything
VDA	Verband der Automobilindustrie
VPN	Virtual Private Network

1 Projektüberblick und Einführung in den Bericht

1.1 Aufgabenstellung

Das automatisierte Fahren von Nutzfahrzeugen bietet eine Chance, dem Problem des wachsenden Fahrermangels in Deutschland entgegenzuwirken und gleichzeitig die Wirtschaftlichkeit des Güterverkehrs zu erhöhen. Ein effizienter und praktikabler Einsatz dieser Technologie erfordert jedoch eine ganzheitliche, systemische Betrachtung des Logistikumfelds und die Integration automatisierter Fahrzeuge in dieses Umfeld. Hierbei stellen querende bzw. entgegenkommende Fahrzeuge in einem Mischverkehr aus automatisierten und manuell betriebenen Fahrzeugen sowie Personen im Terminalbereich Herausforderungen für das automatisierte Fahren dar. Für die Integration stellt sich weiter die Frage, wie fahrfremde Tätigkeiten, die derzeit vom Fahrer ausgeübt werden, beim Betrieb automatisierter LKW dargestellt werden.

Das Verbundprojekt „ANITA“ hatte das Ziel, einen vollautomatisierten, fahrerlosen LKW zu entwickeln und in zwei realen Logistikterminals in Ulm zu erproben sowie dessen Anwendung zu validieren. Dazu standen neben der Fahrzeugentwicklung insbesondere auch die Technologieerprobung sowie die Analyse der Logistikprozesse inklusive der Interaktionsmechanismen zwischen LKW und Mensch / Infrastruktur im Mittelpunkt des FE-Projekts. Durch ein Kommunikationssystem zwischen LKW und Terminals wurden diese digitalisiert und als digitale Missionen – also Fahraufträge, die das Fahrzeug automatisiert ausführt – abgebildet. Zudem wurden neuartige Verfahren zur Umfelderkennung und Objekterkennung im Nahbereich erforscht.

In ANITA wurde ein automatisiertes Fahrzeug mit der allen Funktionen entwickelt, die für die Bewältigung eines realen Logistikprozesses notwendig sind. Dadurch wurden zum einen erstmals die unterschiedlichen Lösungsansätze und Algorithmen gebündelt und anwendungsgerecht weiterentwickelt, zum anderen wurde der Reifegrad und damit die zukünftige Zulassungsfähigkeit der einzelnen Teilfunktionen erheblich gesteigert.

1.2 Voraussetzungen

1.2.1 Industriepolitische Ausgangslage

Mit rund 830.000 Beschäftigten bei Herstellern und Zulieferern (Stand vor dem Projektbeginn 2019) – und davon etwa 20 % in der Nutzfahrzeugsparte – nimmt die Automobilindustrie eine ökonomische, aber auch soziale Schlüsselrolle in Deutschland ein. Dies gilt ebenfalls für die Logistikbranche, die nach der Automobilindustrie und dem Handel den drittgrößten Wirtschaftszweig in Deutschland darstellt. Dabei nimmt die Logistik eine Querschnittsfunktion

ein: Jede andere Branche ist auf eine reibungslose, gut funktionierende Logistik angewiesen, um leistungsfähig und effizient arbeiten zu können. Werden Lieferketten gestört oder unterbrochen, sind die globalen Auswirkungen immens, was gerade in den letzten Jahren besonders sichtbar wurde.

In der öffentlichen Debatte werden je nach Quelle verschiedene Megatrends angegeben, die die Welt von heute und morgen maßgeblich beeinflussen. Von der konkreten Einteilung in allgemeine Trends unabhängig stellt das Automatisierte Fahren eine Schlüsseltechnologie für die Automobilindustrie dar. Zum einen drängen internationale Firmen, besonders aus den USA und China, auf den Markt. Zum anderen – und damit zusammenhängend – können mit der Automatisierung von Fahrzeugen grundlegende Veränderungen am Markt einhergehen, die das Verhältnis zwischen Herstellern, Zulieferern und allen weiteren Beteiligten grundlegend verändern.

So könnte sich die Nachfrage nach Produkten (Fahrzeugen), wie wir sie heute kennen, zu einer Nachfrage nach Transport- und Mobilitätsdienstleistungen wandeln. Player, die diese Nachfrage bedienen können, indem sie etwa automatisiert fahrende PKW (Mobilität) oder LKW (Transport) zur Verfügung stellen, werden am Markt bestehen. Auch für den immer größere werdenden Fachkräftemangel kann durch eine fortgeschrittene Automatisierung begegnet werden.

Um dem beschriebenen Wandel angemessen zu begegnen und die grundsätzliche Technologieführerschaft Deutschlands im Automotive Sektor zu sichern, hat auch die Politik die Notwendigkeit von Investitionen in Forschung und Entwicklung erkannt. Die sich ändernden Anforderungen an die Produkte bzw. Dienstleistungen erfordern einen noch stärkeren Kundenfokus und die Einbettung automatisierter Fahrzeuge in das Ökosystem ihrer Anwender sowie perspektivisch in eine voll vernetzte Industrie 4.0. Das ANITA-Konsortium hat diese Verbindung von Fahrzeug und Ökosystem exemplarisch dargestellt und im Rahmen eines vorwettbewerblichen Forschungsprojekts wertvolle Erkenntnisse gewonnen.

1.2.2 Allgemeine Herausforderungen

Die Auswirkungen des Automatisierten Fahrens auf die Nutzfahrzeugindustrie unterscheiden sich von jenen auf die PKW-Industrie. Während beim Kauf eines PKW auch weiche Faktoren wie Emotionen berücksichtigt werden, steht beim Nutzfahrzeug die wirtschaftliche Betrachtung im Vordergrund. Treibstoff- und Personalkosten stellen die zwei mit Abstand größten Einzelkomponenten der Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership – TCO) von LKW dar. Automatisiertes Fahren adressiert hierbei die Personalkosten, indem die Fahraufgabe vom Fahrzeug selbst übernommen wird.

Ein sinnvoller Schritt auf dem Weg zu einem fahrerlosen Hub-to-Hub-Transport ist der fahrerlose Betrieb auf abgeschlossenem Betriebsgelände. Dieser Anwendungsfall kann bereits wirtschaftliche Vorteile für LKW- bzw. Terminalbetreiber bieten und ist gleichzeitig

technologisch früher zu realisieren als ein uneingeschränkt einsetzbares Automatisierungssystem. ANITA hat genau Anwendungsfall in den Fokus genommen, was sich im Laufe des Projektes als das sinnvollste Vorgehen erwiesen hat. Hier wurde auf zwei abgegrenzten Bereichen – einem Terminal für kombinierten Verkehr (KV-Terminal) und einem Containerdepot – das Potenzial von automatisiert fahrenden Sattelaufliegern getestet. Die Fahrt zwischen den Betriebsgeländen auf der öffentlichen Straße wurde aufgrund von deutlich weitergehenden Regularien bei autonomen Fahrten im öffentlichen Verkehrsraum manuell durchgeführt. Die Terminal- und Depotbereiche sind weitgehend geschützt, die meisten Akteure sind bekannt. Trotzdem wird durch den Mischverkehr von autonomen und manuell gefahrenen Fahrzeugen eine Schwierigkeitsstufe hinzugefügt, die bei anderen Pilotierungen, bei denen autonome Fahrzeuge in streng abgesperrten Bereichen betrieben wurden, nicht gegeben war. Der komplexe Logistikalltag erfordert jedoch genau diese Betrachtung, bei einer technisch ausgereiften Umsetzung kann dies jedoch vor allem im Hinblick auf die Anschlussfähigkeit an internationale Wettbewerber einen Wettbewerbsvorteil der deutschen Industrie bedeuten.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

1.3.1 Projektstruktur

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz im Fachprogramm „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ geförderte Projekt ANITA startete am 01.07.2020 und wurde am 30.09.2023 beendet. Projektträger war die TÜV Rheinland Consulting GmbH, insgesamt waren fünf Projektpartner, ein assoziierter Partner und zwei Unterauftragnehmer beteiligt. Die Projektstruktur ist in Abbildung 1 dargestellt.

- Federführend: MAN Truck & Bus SE (MAN)
- DB Intermodal Services GmbH (DBIS)
- Deutsche Umschlaggesellschaft Schiene – Straße mbH (DUSS)
- Götting KG (Götting)
- Hochschule Fresenius (HS Fresenius)
- Assoziierter Partner: Deutsche Bahn AG (DB AG)

Die Unterauftragnehmer waren:

- AlbrechtConsult GmbH (beauftragt von MAN zur Unterstützung als externes Projektmanagement)
- Deon Digital (Deon) Deutschland GmbH (beauftragt von der Hochschule Fresenius zur Softwareentwicklung)

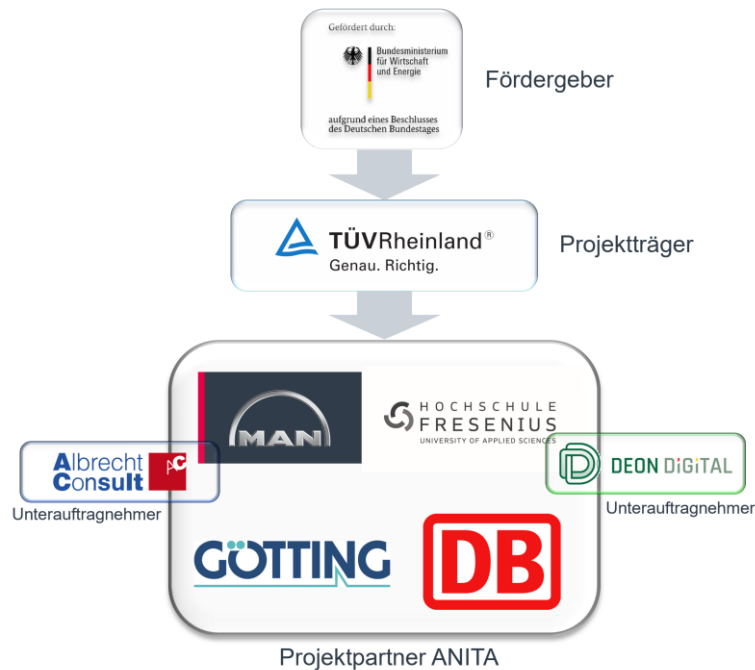


Abbildung 1: Projektstruktur ANITA.

1.3.2 Arbeitspakete und Verantwortlichkeiten

Die Arbeitspakete (AP) 1 bis 7 bauten teilweise sukzessive aufeinander auf, wurden zum Teil aber auch parallel bearbeitet und in monatlichen Regelmeetings miteinander abgeglichen. Die AP-Verantwortlichen berichteten dabei über die Fortschritte und holten sich bei Bedarf Input bei den am AP beteiligten Partnern. Die AP bauen wie im Netzplan (siehe Abbildung 2) dargestellt, aufeinander auf. Die Verantwortlichkeiten waren festgelegt, wie in Tabelle 1 dargestellt.

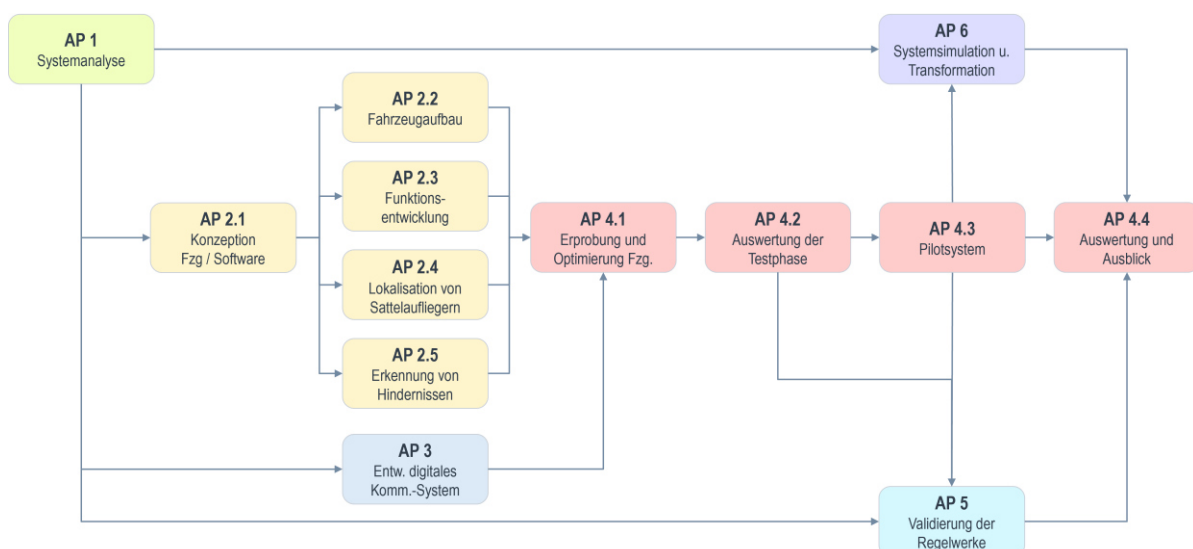


Abbildung 2: Netzplan Arbeitspakete ANITA.

Tabelle 1: Verantwortlichkeiten in den AP

Arbeitspaket	Verantwortlich	Sonstige Beteiligte
AP 1: Systemanalyse und Regelwerkentwicklung	Hochschule Fresenius	DUSS, DBIS, DB AG, MAN
AP 2: Fahrzeugentwicklung	MAN Truck & Bus	Götting (verantwortlich für AP 2.4 und 2.5), HS Fresenius, DB AG
AP 3: Entwicklung eines digitalen Kommunikationssystems	Hochschule Fresenius	Deon, DUSS, DBIS, MAN, Götting
AP 4: Durchführung der Testfahrten	Deutsche Bahn AG	MAN, DUSS, DBIS, Götting, HS Fresenius
AP 5: Validierung der Regelwerke	Hochschule Fresenius	DB AG
AP 6: Systemsimulation und Transformation	Hochschule Fresenius	DB AG, DBIS, DUSS
AP 7: Projektmanagement	MAN Truck & Bus	AlbrechtConsult, DBIS, DB AG, DUSS, Götting, HS Fresenius

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn

Fahrerassistenz und Automatisiertes Fahren im öffentlichen Straßenverkehr

Moderne Fahrzeuge – PKW ebenso wie LKW – sind heutzutage bereits mit einer Vielzahl an Fahrerassistenzfunktionen verfügbar. Bekannte Funktionen mit Durchgriff auf die Fahrzeugführung sind etwa Abstandsregeltempomat (Adaptive Cruise Control – ACC), Spurhalteassistent, Spurwechselassistent und Parkpilot. Darüber hinaus gibt es Assistenzfunktionen ohne direkten Durchgriff auf die Fahrzeugführung, die dem Fahrer nützliche Informationen zur Verfügung stellen. Zu nennen sind hier bspw. Totwinkel- bzw. Abbiegeassistenten. Schwere Unfälle mit LKW und Radfahrern bzw. Fußgängern entfachten insbesondere zu letztgenannten Systemen gesellschaftliche Diskussionen; ab 2022 sind Abbiegeassistenten für Busse und LKW verpflichtend.

Allen genannten Systemen ist gemein, dass sie Assistenzsysteme darstellen, die den Fahrer lediglich unterstützen. Dieser trägt wie beim rein manuellen Fahren zu jeder Zeit die vollständige Verantwortung über die Fahrzeugführung. Die Systeme funktionieren in

begrenzten Anwendungsbereichen, der Fahrer ist von vornherein als Rückfallebene für Fehlfunktionen bzw. ein Verlassen des Anwendungsbereichs eingeplant und muss das System dauerhaft überwachen. Systeme dieser Art werden den Automatisierungsgraden der Stufen 0 bis 2 zugeordnet (nach SAE International 2019).

Ab der Automatisierungsstufe 3 ist der Fahrer nicht mehr dazu verpflichtet, das System dauerhaft zu überwachen. Damit stellt der Sprung von Stufe 2 zu Stufe 3 sowohl in technischer als auch in rechtlicher Hinsicht eine Besonderheit dar. So kann das System hier nicht mehr instantan auf den Fahrer als Rückfallebene zurückgreifen, sondern muss ein Erreichen der Systemgrenzen antizipieren und den Fahrer mit ausreichend großem zeitlichem Vorlauf zur Übernahme der Fahraufgabe auffordern. Aus rechtlicher Sicht ist der Einsatz von Systemen der Stufe 3 grundsätzlich erlaubt. Systeme der Stufen 4 und 5 waren zu Projektbeginn nicht auf öffentlicher Straße zugelassen, wobei hier mit der Verordnung zur Regelung des Betriebs von Kraftfahrzeugen mit automatisierter und autonomer Fahrfunktion von 2022 ein neuer rechtlicher Rahmen geschaffen wurde. Im Nutzfahrzeugbereich sind es die Stufen 4 und 5, die einen wirtschaftlichen Mehrwert bieten. Der fahrerlose Betrieb, der mit diesen Automatisierungsgraden einhergeht, ermöglicht die Einsparung der Personalkosten, die derzeit ca. 30 % der Gesamtbetriebskosten ausmachen (PwC 2016).

Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF)

Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) werden seit über vierzig Jahren in der industriellen Praxis erfolgreich zur Transportautomatisierung verwendet, meist jedoch mit geringen Geschwindigkeiten und in stark kontrollierten Umgebungen. Eine große Bedeutung haben die FTF insbesondere in der Automobilindustrie, in der die meisten Fahrerlosen Transportsysteme (FTS) eingesetzt werden.

Diese Fahrzeuge sind in der Regel kleiner als klassische LKW, werden innerhalb von Gebäuden eingesetzt und batterieelektrisch angetrieben. Fahrzeuge mit einem Eigengewicht von mehr als 10 t sind vergleichsweise selten – insbesondere solche, die im Außenbereich eingesetzt werden.

Neben den typischen FTF kommen in Häfen auch automatisierte Containertransportfahrzeuge zum Einsatz, bspw. in Rotterdam und in Hamburg. In den letzten 20 Jahren sind über 1.000 Einheiten in Betrieb genommen worden. Diese Fahrzeuge können in einem abgesperrten Gebiet ohne Zugang für Personen vollautomatisch betrieben werden. Zur Lokalisierung werden überwiegend Transponder im Boden genutzt. Dadurch ist ein wirtschaftlicherer Betrieb mit höheren Fahrgeschwindigkeiten möglich.

Während für die Navigation anhand von künstlichen Marken im Außenbereich bereits seit Jahren mehrere Verfahren zum Stand der Technik gehören (induktive Leitlinien, Magnetpunkte, Transponder), konnte sich die Lokalisation ohne künstliche Marken für Outdoor-Anwendungen noch nicht etablieren. Die notwendige Sicherheit leitet sich bei FTF nicht durch die Straßenverkehrsordnung ab, sondern durch innerbetriebliche Regelungen –

insbesondere die Maschinenrichtlinie. Eine zusammenfassende Darstellung der für FTS anzuwendenden Vorgehensweisen findet sich bspw. im Leitfaden FTS-Sicherheit des VDI (VDI 2020). Die für FTS geltende DIN EN 1525 und der Nachfolger ISO 3691--4 (BGHW Spezial 2017). Zur Erfüllung der geforderten Sicherheitsklasse wird in der Praxis eine individuelle Kombination von mechanischen Sicherheitsschaltern (sog. „Bumper“), sicherheitszertifizierten Laserscannern und manuellen Not-Aus-Tastern verwendet.

Die Sensoren und dahinterliegenden Steuerungen müssen in der Regel SIL2 entsprechen. Die begrenzte Sensorreichweite, in der diese Bedingungen eingehalten werden können, ist entscheidend für die Festlegung der maximalen Fahrgeschwindigkeit. Die erreichbaren Fahrgeschwindigkeiten liegen bei bis zu 10 km/h unter guten Bedingungen, bei besonderen Gefährdungspotenzialen oder unvollständiger Sicherung oft nur bei 0,3 m/s. Weiterhin ist ein Ausweichen bei temporären Hindernissen bei konventionellen FTS in der Regel nicht möglich.

Es existieren somit zwar Technologien, die im Innenbereich gut funktionieren, z. B. optische Sensoren wie Laserscanner, 2D / 3D-Kameras oder Photomischdetektoren (PMD), diese haben jedoch im Außenbereich ggf. Probleme mit Verschmutzung, ungünstiger Witterung, Temperaturschwankungen und störendem Sonnenlicht. Daher werden bisher nur Sensoren mit einer eingeschränkten Eignung für den Außenbereich hinsichtlich der sicher überwachten Reichweite bzw. der Verfügbarkeit angeboten. Bisher verwendete taktile Sensoren, die bei Berührung einen Nothalt auslösen, sind nur für sehr kurze Anhaltewege und damit nur für geringe Geschwindigkeiten, geeignet. Die größten Hemmnisse zur Verwendung von FTF im Außenbereich sind damit die fehlende Zuverlässigkeit und Sicherheit der umgebungserkennenden Sensoren sowie die Verarbeitung der Informationen zur autonomen Steuerung, die eine auf die aktuelle Situation angepasste Reaktion erlaubt.

Regelwerkentwicklung

Automatisiert oder autonom fahrende Fahrzeuge unterscheiden sich grundständig von Fahrzeugen, die von einer Person gesteuert werden. Dies betrifft vor allem die Informationsbeschaffung und -verarbeitung und die damit verbundene Interpretation von Regeln und das Treffen von Entscheidungen. So kann sich der menschliche Fahrer notwendige Informationen aktiv selbst beschaffen – er nutzt einen infiniten Datenpool – dem autonomen Fahrzeug müssen jedoch alle relevanten Informationen zur Verfügung gestellt werden – es greift auf einen finiten Datenpool zu – so dass sichere und performanten Entscheidungen getroffen und entsprechende Verhaltensweisen abgeleitet werden können. Das Ziel der Hochschule Fresenius im vorliegenden Projekt bestand zunächst darin, adäquate Analysen der Verhaltensweisen von Menschen und Maschinen (Fahrzeuge, Krane, Stapler etc.) durchzuführen und Informationspools und verbundene Regelwerke (explizite wie auch implizite) zu identifizieren, um darauf aufbauend Verhaltensregeln für den autonomen LKW abzuleiten.

Digitalisierungsansatz

Die Logistikdomain ist in einigen Bereichen durch den Austausch von Informationen und Dokumenten zwischen den Marktteilnehmern über analoge Kommunikationsmittel wie Telefon oder Fax geprägt, in anderen Bereichen werden Excel Protokolle oder verschiedene Datenbanksysteme genutzt. Der basale Schritt des Digitalisierungsansatzes bestand darin, alle notwendigen Informationen digital verfügbar zu haben, in einem weiteren Schritt die verschiedenen Endpoints miteinander zu vernetzen und den sicheren Austausch von Informationen und eine angestrebte Prozessabfolge zu gewährleisten. Wir nutzen hierfür den Ansatz von digitalen Verträgen.

Die digitale Vertragsabwicklung beschleunigt den Gesamtprozess, da die manuelle Bearbeitung von Transportdokumenten reduziert wird. Grundvoraussetzung für einen flächendeckenden Rollout ist jedoch ein gemeinsames Datenmodell (Insellösungen müssten vermieden werden), sodass Systeme vereinfacht miteinander kommunizieren können.

Simulationen

Da sich automatisierte Fahrzeuge anders verhalten als analoge Fahrzeuge, ergeben sich für Terminalverkehre auch andere Auslastungsszenarien. Um diese - nicht nur für ein automatisiertes Fahrzeug – vorhersehen zu können, wurden verschiedene Fahrzeug- und Terminal-Modelle aufgebaut und mit verschiedenen Auslastungen durchsimuliert.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit wurde ein Austausch mit dem Projekt „SAFE20: Sicheres autonomes Fahren in Automatisierungszonen mit 20 km/h“ initiiert. Durch eine ähnliche Konstellation in den Grundvoraussetzungen – Einsatz autonomer Fahrzeuge im Mischverkehr auf einem abgeschlossenen Gelände von Logistikern – bot sich hier die Gelegenheit zum Austausch miteinander. Im Dezember 2022 fand ein Meeting zum Kennenlernen statt. Der wesentliche Unterschied der beiden Projekte: In ANITA bekommt der automatisierte LKW sein Ziel und entscheidet selbstständig über seine Route. In SAFE20 wird den Fahrzeugen, in diesem Fall Spezialfahrzeugen für den Hofbetrieb, die Route vorgegeben. Im Zusammenspiel mit der Infrastruktursensorik und der fahrzeugeigenen Intelligenz wird die Mission ausgeführt. Da die Schnittstelle zwischen dem Hub und den Fahrzeugen ein zentraler Punkt beider Projekte ist, fand Anfang 2023 ein weiterer Austausch zum Thema „Elektronischer Leitstand“ statt. Auch später und noch nach Projektende kam es zu punktuellen Kontaktaufnahmen zu einzelnen Themen.

Während der gesamten Projektlaufzeit fanden bei der Hochschule Fresenius verschiedene Workshops und Meetings zum Autonomen Fahren im House of Logistics and Mobility (HOLM) und den verbundenen Netzwerkpartnern statt.

In den Bereichen “Deontische Logik” und “Programming Languages” wurde ferner Prof. Fritz Henglein vom Computer-Science Department der Universität Kopenhagen einbezogen.

2 System – Kommunikation – Simulation (Hochschule Fresenius; AP 1, AP 3, AP 5, AP 6)

Nachfolgend werden die Arbeitspakete der Hochschule Fresenius und des Unterauftragnehmers Deon Digital zusammenhängend dargestellt.

2.1 Systemanalyse, Regelwerkentwicklung und Missionsplanung I

2.1.1 Ausgangslage

Das ANITA Projekt verfolgt das Ziel, einen automatisiert agierenden LKW zu entwickeln und in die Anforderungen und Rahmenbedingungen des Transport- und Logistik-Systems sinnvoll zu integrieren. Da sich automatisierte Fahrzeuge grundsätzlich anders verhalten als nicht automatisierte, ist die Fahrzeug-Integration unmittelbar mit der Veränderung von Systemprozessen verbunden. Je nach Aufbau und Funktionieren des Systems können Veränderungen – auch von nur wenigen Bestandteilen oder Prozessen – zu erheblichen funktionalen Veränderungen führen, weshalb entsprechende Systemanalysen von zentraler Relevanz sind. Den Einstieg bildete gleichwohl die Analyse von einschlägigen Publikationen, die sich mit den Anforderungen an autonome Fahrzeuge und Terminalfunktionen auseinandersetzen (z. B. Inninger et al. 2018, Tioga Group 2011, Hynh & Hutson 2008, Hur et al. 2020, Maurer et al. 2016, Reimer et al. 2011, Makarova et al. 2020). In einem weiteren Schritt wurde auch Bezug über Fahrzeuge hinaus auf autonome Systeme genommen (z. B. Wahlster 2017). Weitere wichtige Komponenten in der Literaturanalyse bezogen sich auf soziotechnische und kognitive Aspekte z.B. die Bereiche „Sense Making Loop“, „Thing Theory“, „Systems Thinking“, „Computational Thinking“, „Deontic Reasoning“ (z. B. Weick et al. 2005, Kovács & Spens 2005, Arnold & Wade 2015, Applin & Fischer 2013).

Da Simulationen ein wesentliches Arbeitspaket darstellten, wurden in diesem Bereich ebenfalls einschlägige Literaturanalysen vorgenommen (siehe hierzu Kap. 2.5).

2.1.2 Arbeitsschritte

Der empirisch analytische Teil in der Systemanalyse ist durch folgende Methoden und Arbeitsschritte gekennzeichnet:

- Dokumentenanalysen
 - Hausordnungen (DUSS)
 - Verhaltensregeln (DBIS)
 - Betriebsanleitung
 - Arbeitsanweisungen
 - Austauschdokumente (An- und Ablieferscheine, Ladungsdokumente, etc.)
 - sonstige Dokumente
- Interviews mit Mitarbeitenden im System
 - DUSS
 - DBIS (auf unterschiedlichen Hierarchieebenen / mit unterschiedlichen Arbeitstätigkeiten und an unterschiedlichen Standorten)
- Teilnehmende und verdeckte Beobachtungen von Terminalprozessen
 - Prozessanalyse
 - Prozessbewertung (bspw. Befolgung oder Nichtbefolgung von Regeln)
 - Prozessquantifizierung (Messung der Dauer von Abläufen)
- Schriftliche Befragung (Fragebogenanalysen)
 - zu Prozessen („happy flows“)
 - zu Prozessabweichungen („unhappy flows“, „exception handling“)
 - Prozessdauern

Deontic Reasoning wurde als übergreifende Methode eingesetzt, um implizite Wissensbestände in explizite zu überführen und aus verteilten Informationsbeständen Regelwerke abzuleiten.

Alle angewandten Analysenmethoden bezogen sich generell sowohl auf die DBIS als auch auf die DUSS. Zur Überprüfung, inwieweit Systembestandteile und -prozesse spezifisch für das Testumfeld - Depot und Terminal in Ulm - sind oder eine generalisierende Gültigkeit haben, wurden weitere Depots der DBIS sowie Terminals der DUSS in die Analyse einbezogen.

2.1.3 Ergebnisse

Systemkomponenten

In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die Systembestandteile strukturiert dargestellt. Die Extraktion der Systembestandteile resultiert aus der Analyse mehrerer DBIS-Depots sowie DUSS-Terminals. Die angeführten Komponenten stellen gute Repräsentanten des Systems dar, allerdings muss nicht jede Systemkomponente an jedem Standort vorhanden sein.

Tabelle 2: Darstellung der Systemagenten und deren Cluster-Zugehörigkeit, Hinweis: mit ** markierte Agenten sind nicht typisch für die Testinfrastruktur in Ulm.

Systemcluster und -agenten	
Organisationseinheiten	DUSS DBIS Frachtführer Spedition Reeder Eisenbahnverkehrsunternehmen Zugoperator ** Frachtbörse
Ladeeinheiten	Leer-Container Last-Container (beladen) **Trailer-leer **Trailer-beladen
Informationsaustausch / Kommunikationsstruktur	Fax Funk Telefonisch Papierprotokolle Mündlicher Austausch E-Mail Non verbal, bspw. Handzeichen
IT & Datenbanksysteme	COSI BLU AXO (Datenbankverzeichnis DUSS) div. Excel-Protokolle
Infrastruktur	„Fischgräte“ (Parkposition) Raster für Kranung (DUSS) Raster / Verladebereich (DBIS) Anmeldevorgang Self-Help Terminal (DBIS) Anmeldeschalter für Lastcontainer (DBIS) Anmeldeschalter (DUSS) Zugoperateur (verschiedene) Schalter für Kranauftrag
Fahrzeuge	Externe LKW Interne (Umfuhr) LKW Terminalzugmaschinen

Systemcluster und -agenten	
Be- und Entlademaschinen	Portal-Kran Reachstacker / Containerstapler Flurfördergeräte
Personen	Disponent Checker Wagenmeister (DUSS) Kranführer Reachstacker-Fahrer / Containerstapler-Fahrer Mitarbeiter Anmeldung LKW-Fahrer Mitarbeiter Werkstatt
Regelwerke	Hausordnung (DUSS) Verhaltensregeln (expliziert) DBIS StVO Hinweisschilder Bodenmarkierungen Implizite (erfahrungsbasierende) Verhaltensregeln
Weitere relevante Komponenten	Wetter (Wind, Schnee) Tageszeit (Rushhour) Umbau der Infrastruktur

Systemcharakteristik

Neben den Systemkomponenten sind vor allem die Interaktionen, deren Varianzspektrum und Entwicklungen für die Systembeschreibung von Relevanz. Im Kern lässt sich das System wie folgt charakterisieren:

Durch den Austausch von Material (Ladeeinheiten) und damit verbundenen Informationen ist das System als offenes System zu charakterisieren. Es ist ferner ein horizontal und vertikal hoch vernetztes (Net-Chain) Multi-Agenten-System mit zahlreichen Interaktionen zwischen den Akteuren sowohl innerhalb der Terminal-Systemgrenzen (z.B. Kran, Container-Stapler) als auch außerhalb (Reeder, Spediteur).

Das System zeigt eine hohe Sensitivität gegenüber Kontrollparametern – z. B. die Verfügbarkeit von Staplern – und kann somit multistabile Zustände einnehmen bzw. kippen.

Da jede Ladeeinheit von einem Satz an Informationen begleitet wird, die bei jeder Übergabe mit den verschiedenen Datenpools abgeglichen werden müssen, ist das System als informations- und kommunikationsintensiv einzuordnen, wobei die Art der Kommunikation multimodal erfolgt, d.h. über den Austausch von Papierdokumenten, verbal, aber auch

nonverbal (Gesten) etc. Neben der Kommunikation zwischen Personen (Human to Human – H2H) sind auch Kommunikationsstränge zwischen Menschen und Maschinen (Human to Machine – H2M) und vice versa vorhanden.

Das System zeichnet sich durch zahlreiche gewachsene Strukturen aus, die in infrastrukturellen und soziotechnischen Abhängigkeiten stehen, weshalb sich bspw. verschiedene DUSS-Terminals oder verschiedene DBIS-Depots auch unterschiedlich entwickelt haben. Grundlage hierfür sind bspw. die verfügbaren Flächen für die Containerlagerung oder die Anzahl an Kranen und Kranspuren, die wiederum mit den verfügbaren Flächenkontingenten zusammenhängen.

Im soziotechnischen Bereich sind insbesondere zahlreiche implizite (nicht dokumentierte bzw. gewohnheitsbasierende) und fragmentierte Wissensbestände und verschiedene mentale Modelle (bzgl. Optimalitätskriterien) hervorzuheben und damit verbundene Handlungsrouinen und Selbstoptimierungsfunktionen in den Prozessen.

Hieraus resultiert auch ein Abweichen von einfachen Kausalitätsfunktionen (Ursache-Wirk-Relationen), weshalb das System als „komplex“ eingeordnet werden kann. Eine weitere Folge der Fragmentierung in Subsysteme besteht darin, dass sich die Umstrukturierung von Prozessen als aufwändig darstellt, da ein zentrales Informationsmanagement je Organisationseinheit oder ein entsprechend organisations-übergreifendes Management nur begrenzt vorhanden ist, weshalb das Funktionieren von Prozessen stark personenbezogen ist. Hiermit verbunden sind auch zahlreiche handwerkliche Tätigkeiten.

Im Hinblick auf die digitale Infrastruktur zeigt sich eine hohe Heterogenität im Hinblick auf Schnittstellen, Datenlogik, Echtzeitfähigkeit etc. (siehe hierzu auch das Kap. 2.3).

Weitere Systemmerkmale sind ein High-Volume-Handling mit quasi kontinuierlichem Betrieb, sowie eine hohe Sicherheits- und Regelkonformität. Infolge dieser Konstellation sind experimentelle Parallelprozesse nur aufwändig zu integrieren.

Neben der Infrastrukturabhängigkeit konnten mehrere Attraktoren im System identifiziert werden (bspw. bestimmte Kunden, saisonale Funktionen, Schiene Closing-Zeiten, externe Umläufe der Speditionen), die das Systemfunktionieren kurzfristig „versklaven“, d.h. neue „Regeln“ durchsetzen (siehe hierzu auch nachfolgend).

Systemregeln

Die Regelbasis resultiert zunächst aus der „Hausordnung“ der DUSS sowie den „Verhaltensregeln“ der DBIS. In beiden Regelwerksets wird auf die Gültigkeit der Straßenverkehrsordnung hingewiesen, wodurch sich eine zentrale Prägung für das Verhalten ergibt. Weitere zentrale Prägungen ergeben sich durch den Hinweis, dass bestimmte Maschine des Depot- bzw. Terminalbetriebs (bspw. Stapler, Zugmaschinen) Vorrang haben und, dass den Anweisungen des Depot- bzw. Terminalpersonals Folge zu leisten ist.

Weiterhin sind verschiedene spezifische Verhaltensregeln vorhanden, wie bspw. das verbindliche Tragen von Warnwesten auf dem Depot und Terminal, die Verpflichtung zum Tragen eines Helms im Verlade- bzw. Gefahrenbereich oder das Verbot, sich unter schwebenden Lasten aufzuhalten bzw. mit einem Fahrzeug hindurchzubewegen / hindurchzufahren.

Neben den expliziten Regeln ließen sich auch implizite Regeln identifizieren, so dass bspw. bei einem hohen Verkehrsaufkommen „eigene“ Vorfahrts- oder Überholregeln „angenommen“ werden, um den Verkehrsfluss sicherzustellen. Gewöhnlich wird diesem „eigenen Regelwerk“ stillschweigend stattgegeben, sofern Sicherheitsvorschriften nicht grob verletzt werden.

Relevant ist die Identifikation dieser Regeln unter anderem deshalb, da sie im Ursprung für den Menschen entwickelt wurden (die Prüfung der Einhaltung dem Menschen obliegt), sie allerdings (in der aktuellen Fassung) in gleicher Weise für (ggf. fahrerlose) Maschinen gelten, was bspw. bezüglich der Regel „den Anweisungen des Depot- bzw. Terminalpersonals ist Folge zu leisten“ entsprechende Herausforderungen mit sich bringt. Implizite Regeln gelten natürlich nicht für automatisierte Fahrzeuge, gleichwohl können sie im Mischverkehr, in dem automatisierte und nicht automatisierte Fahrzeuge interagieren, eine Rolle spielen.

Systemprozesse

Die Extrahierung der Prozesse im DUSS-Terminal und im DBIS-Depot war durch zahlreiche Iterationen gekennzeichnet:

Prozess-Darstellung → Prozess-Prüfung mit den DUSS- und DBIS-Mitarbeitenden → Prozess-Überarbeitung → neue Prozess-Darstellung → erneute Prozess-Prüfung etc.

Im Rahmen der Prozess-Darstellung wurde auf die Prozesssprache BPMN (Business Process Model and Notation 2.0) zurückgegriffen. Die nachfolgende Abbildung 3 zeigt schematisch den Ist-Stand mit einer Zweifach-Untergliederung jeweils für das Terminal und das Depot.

Hinweis: Bei allen nachfolgend gezeigten BPMN (2.0) Schemata geht es im vorliegenden Bericht nur um die Veranschaulichung auf Makro-Ebene, die Meso- und Mikro-Ebene wird nicht kenntlich gemacht, was in Teilen auch mit Vertraulichkeitsaspekten zu tun hat.

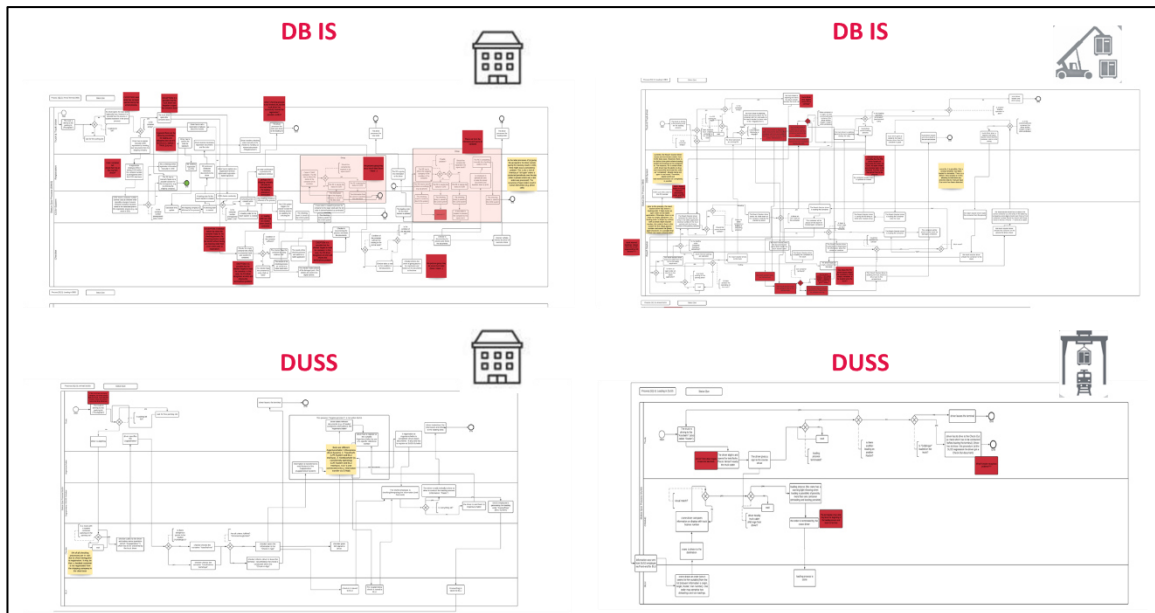


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Ist-Standes, der im vorliegenden Fall in die Prozesse „Ankommen am Terminal bzw. Depot und Anmeldung“ (links) sowie „Verladung und Verlassen“ (rechts) differenziert wurde. Die (horizontalen) Layer in den Modellen stellen die Agenten dar.

2.2 Validierung der Regelwerke und Missionsplanung II

Die Planung der Mission besteht im Kern aus der Erstellung des Fahrauftrages für den LKW, d. h. was (welche Ladeeinheit) wird wohin gefahren und an wen ausgeliefert, und ist somit die Verbindung zwischen dem Fahrzeug, den Infrastrukturkomponenten und den Informationsbeständen. Die Voraussetzung für diese Entwicklung besteht einerseits aus der Validierung der Regeln, die während der Mission Bestand haben, und andererseits aus den Erstellungen von neuen Verhaltensregeln für den digitalen Prozess, der die analogen und nicht mehr funktionalen Regeln ablöst. Auch in diesen Entwicklungs- und Prüfschritten wurde ein iteratives Vorgehen gewählt, das ebenfalls standortübergreifend durchgeführt wurde. Iteration bedeutet hier die Präsentation von Prozessen in Abhängigkeit von der Infrastruktur und die Gültigkeitsbestätigung durch die lokalen Domain-Experten.

In Erweiterung der initialen Darstellung der Systemprozesse bot sich nun eine weitere Differenzierung auf die nachfolgenden vier Kernbereiche an (gültig für Container als Ladeeinheit).

- 1) Nach dem Erreichen des Geländes und dem Parken auf den zur Verfügung stehenden Parkplätzen (sog. „Fischgräte“) erfolgt die Anmeldung, wobei je nach Ladeeinheit (Leer-Container oder Last-Container) eine Anmeldung am Schalter oder am Self-Help Terminal erfolgen muss. Dabei werden unterschiedliche Informationen bzw. Dokumente ausgetauscht und abgeglichen.

- 2) Sofern eine Ladeeinheit (Container) mitgebracht wird und abgegeben werden soll, wird diese einem manuellen Check unterzogen. Während bei der DUSS ausschließlich einer Prüfung auf Schienentauglichkeit erfolgt, wird bei der DBIS ein erweiterter Qualitätscheck durchgeführt, um zu überprüfen, für welche Ladungen (bspw. Lebensmittel oder Holz) der Container in Zukunft geeignet sein kann (das Checkergebnis wird hier auf der Containeraußenseite festgehalten).
- 3) Bei erfolgreichem Check erfolgt im Anschluss die Fahrt zum Verladeort, wobei bei der DUSS ein spezielles Raster in der Kranspur vorgegeben wird, während bei der DBIS nur eines der freien Raster erreicht werden muss.
- 4) Beim Verladevorgang ist zu differenzieren, ob er einfach oder kombiniert erfolgt (einfach: nur Abgabe der Ladeeinheit bzw. nur Erhalt einer Ladeeinheit, oder kombiniert: Abgabe einer Ladeeinheit und direkt nachfolgend Erhalt einer neuen Ladeeinheit). Wird eine kombinierte Verladung bei der DUSS durchgeführt, so kann ein Rasterwechsel erforderlich sein. Aus Sicherheitsgründen muss der LKW-Fahrer (auch der Sicherheitsfahrer) bei der Verladung außerhalb des LKW stehen und Blickkontakt zum Containerstapler-Fahrer oder Kranführer haben. Die Twist-Locks sind im Vorfeld zu öffnen. Sofern ein neuer Container erhalten wird, sind die Twist-Locks bei der DUSS direkt wieder zu schließen, während bei der DBIS (in Ulm) eine kurze Fahrt zu einem Wartebereich erfolgt, auf dem dann die Schließung vorgenommen wird.

Für die Umfuhrprozesse – auf die sich das ANITA-Projekt hauptsächlich konzentriert – sind noch weitere Aspekte zu spezifizieren. Hier ist der Disponent der DBIS der initiale „Auslösepunkt“, bevor der LKW mit dem Betrieb beginnen kann. Der Disponent selbst erhält Aufträge von den Zugbetreibern und erstellt daraufhin die Transportaufträge² (Umfuhrliste), die dann mit den weiteren Prozessen verbunden sind.

Aufbauend auf den System- und Prozessanalysen sowie den Validierungen wurden für die digitale Transformation in mehreren Iterationen „Message Flows“ für den Umfuhrprozess von Leer-Containern generiert, überprüft, verändert und wieder überprüft. Dieser Validierungsprozess ist eng verbunden mit der Entwicklung des digitalen Kommunikationssystems (Kap. 2.3). Wichtig ist hierbei u. a., dass wesentliche Teile der zu kommunizierenden Informationen in ein digitales Format übertragen wurden, weshalb hierfür entsprechende Schnittstellen berücksichtigt bzw. konzipiert werden mussten. Allerdings sind einige Informationseinheiten nach wie vor nur analog verfügbar: So ist es auch für den Safety-Driver obligatorisch, das Fahrzeug während des Be- oder Entladevorgangs zu verlassen, mit dem Stapler-Fahrer oder Kran-Führer Blickkontakt aufzunehmen und über Handzeichen das „Go“ für den Ladevorgang zu bestätigen. Grundsätzlich ist es ohne großen Aufwand möglich, auch diesen Prozess vollständig digital abzubilden, im vorliegenden Fall

² Im Anita-Projekt werden nur leere Container berücksichtigt

wurden aus organisationalen Gründen auf einen Parallelbetrieb von digitaler und analoger Kommunikation gesetzt. Relevant für den Message-Flow und den Validierungsprozess war zunächst, dass die richtigen Parteien bzw. Agenten miteinander kommunizieren. Im digitalen Format sind dies die beiden TOS (Terminal-Operation-Systems) COSI und BLU sowie der LKW. Ferner ist relevant, dass die gesandten Informationen ankommen (zu den Schnittstellen findet sich ausgiebige Information in Kap. 2.3) und verstanden werden³. Das Verstehen ist unmittelbar mit dem Inhalt (was wird kommuniziert) und mit der Erwartungshaltung auf Seiten der Empfangsstelle verbunden. Final ist relevant, dass die richtige (gewünschte) Reaktion auf Seiten des Empfängers ausgelöst wird.

Der enge Validierungsprozess erfolgte zweistufig:

In der *ersten Stufe* wurden die Parteien bzw. Endpoints von Domainexperten reziprok simuliert, d. h. bspw. der „COSI-Experte“ sendet eine Information an den „Truck-Experten“ und dieser meldet zurück, ob diese Information zum aktuellen Zeitpunkt geeignet ist, sodass der Truck seine nächste Etappe fahren kann. Ebenso meldet bspw. der „BLU-Experte“, welche Erwartungshaltung er hat (welche Information benötigt er), damit er den nächsten Teilprozess starten kann.

In einer *erweiterten (zweiten)* Validierungsstufe wurden digitale Mockups der Akteure *Truck*, *COSI* und *BLU* gebaut, die dann eigenständig (digital) miteinander kommunizieren. Die Verbindung der beiden Stufen kann in den nachfolgenden vier Szenarios abgebildet werden:

Szenario I - Nachrichtenfluss: LKW trifft am DBIS-Terminal ohne Container ein

- Der Disponent sendet einen Transportauftrag ("Umfuhrauftrag") an das DKS (Digitales- Kommunikations-System⁴).
- DKS fragt bei BLU an, ob die Referenznummer verfügbar ist.
- BLU informiert DKS, ob die Referenznummer verfügbar ist.
- Das DKS überträgt den Transportauftrag an den LKW (Voraussetzung: Die Referenznummer ist derzeit verfügbar).
- Sobald der LKW das Terminal erreicht, sendet er eine entsprechende Information an das DKS und fährt anschließend zum Raster / Reachstacker.
- Der LKW sendet Ankunftsinformationen am Raster und Bereitschaft, den Container zu empfangen, an das DKS.
- Das DKS leitet die Information an COSI weiter.
- COSI sendet alle relevanten Daten, damit der Anlieferschein erstellt werden kann.

³ An dieser Stelle wird anlehnender Bezug zu den Unwahrscheinlichkeitsniveaus von Luhmann & Luhmann (1981) genommen.

⁴ Das DKS wird später auch als „Broker“ bezeichnet

- Der LKW sendet die relevanten Informationen über den abgeschlossenen Ladevorgang.
- Das DKS gibt bekannt, dass der LKW die Parkposition verlassen kann.
- Das DKS überträgt den Anlieferschein an das BLU-System.

Szenario II - Nachrichtenfluss: LKW trifft am DBIS-Terminal mit einem Container ein

- Der LKW fährt zur initialen Parkposition ("Fischgräte") und sendet entsprechende Informationen an das DKS, wodurch er registriert ist.
- COSI sendet Informationen über den Status der Containerkontrolle an der "Fischgräte".
- Das DKS überträgt die Fahranweisung (Verlassen der Parkposition) an den LKW.
- Der LKW sendet Ankunftsinformationen an das DKS.
- Wenn kein neuer Container auf den LKW geladen wird, gilt Folgendes:
 - Das DKS erhält nur die Information, dass der Entladevorgang erfolgreich abgeschlossen wurde (aus Sicherheitsgründen).
- Wenn ein neuer Container auf den LKW geladen wird, gilt Folgendes:
 - COSI sendet alle relevanten Daten, damit der nächste Anlieferschein erstellt werden kann.
- Der LKW sendet die relevanten Informationen über den abgeschlossenen Ladevorgang.
- Wenn kein weiterer Transportauftrag zu erledigen ist, gilt Folgendes:
 - Das DKS gibt bekannt, dass der LKW die Parkposition verlassen kann. Wenn ein neuer Transportauftrag vorliegt, gilt der Prozess analog zu Szenario I.

Szenario III - Nachrichtenfluss: LKW trifft am DUSS-Terminal ohne Container ein

- Der Disponent sendet einen Transportauftrag ("Umfuhrauftrag") an das DKS.
- Das DKS fragt an, ob die Referenznummer verfügbar ist.
- BLU informiert das DKS, ob die Referenznummer verfügbar ist.
- Das DKS überträgt den Abholschein an das BLU-System; BLU muss den Containerstatus über die Referenznummer ändern. DUSS ist verantwortlich für die Erstellung der Krananweisung.
- Das DKS-System überträgt die Fahranweisung mit Ziel ("Fischgräte") an den LKW.
- Der LKW registriert sich, indem er die relevanten Informationen an das DKS sendet.
- Der LKW sendet eine Benachrichtigung an das DKS. Ankunft an der Fischgräte.

- BLU sendet die Kranbahnnummer und das Raster.
- Das DKS-System überträgt den Transportauftrag (neues Ziel: Kranbahn und Raster) an den LKW.
- Der LKW sendet eine Benachrichtigung an das DKS: Ankunft am Raster und bereit zum Laden.
- BLU sendet Informationen über den Abschluss des Kranvorgangs an das DKS.
- Der LKW sendet die relevanten Informationen über den abgeschlossenen Ladevorgang.
- Das DKS-System gibt bekannt, dass der LKW das Raster verlassen kann.

Szenario IV - Nachrichtenfluss: LKW trifft am DUSS-Terminal mit einem Container ein

- Sobald der LKW das Terminal erreicht, sendet er Informationen an die DKS-Anwendung.
- Dieses Ereignis löst den Checkprozess aus.
- BLU sendet die Checkinformationen an das DKS.
- Das DKS informiert BLU (DUSS-Mitarbeiter), dass ein Mitarbeiter den "Agentur-Prozess" und den "Prüfprozess" überprüfen muss, um die Krananweisungen zu generieren oder es erfolgt eine automatisierte Krananweisung.
- BLU sendet die Kraninformationen an das DKS.
- Das DKS sendet die Kranposition an den LKW (dies ist das Go-Signal).
- Der LKW sendet eine Benachrichtigung an das DKS: Ankunft am Raster und bereit zum Laden.
- BLU sendet Informationen über den Abschluss des Kranvorgangs an das DKS.
- Das DKS-System gibt bekannt, dass der LKW das Raster verlassen kann.

Die BPMN-Visualisierung der oben dargestellten Szenarien findet sich nachfolgend (Abbildung 4). Integriert ist in diesen jeweils das DKS als verbindende Instanz.

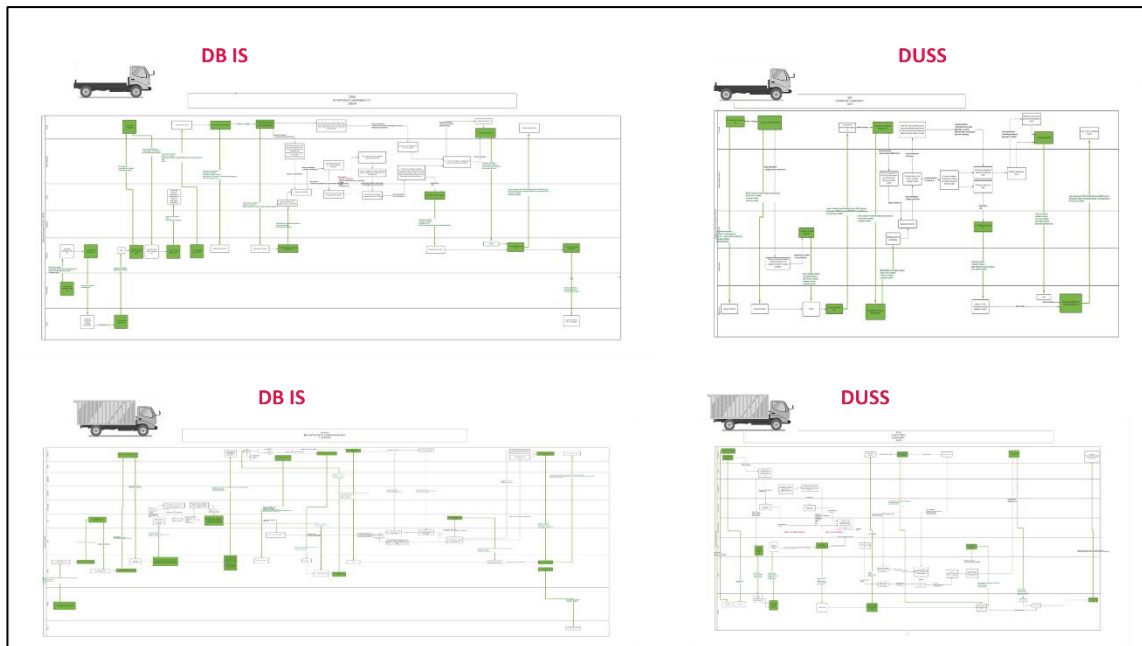


Abbildung 4: BPMN-Schema der physischen Prozesse und der Informationsübertragung bei vier Teilen des Umfuhprozesses mit integriertem DKS.

Während das oben dargestellte Schema singuläre Umfuhren repräsentiert, ist im nachfolgenden Schema (Abbildung 5) die Logik für verbundene Umfuhren skizziert. Verbunden bedeutet hierbei, dass während eines Aufenthalts bei der DBIS oder DUSS sowohl Container abgeliefert als auch abgeholt werden, welches ökonomisch von hoher Relevanz ist. Wichtig zu beachten ist hierbei, dass verknüpfte Umfuhren nicht einfach das Hintereinanderschalten von singulären Umfuhren sind, sondern einer vollständig neuen Logik bedarf.

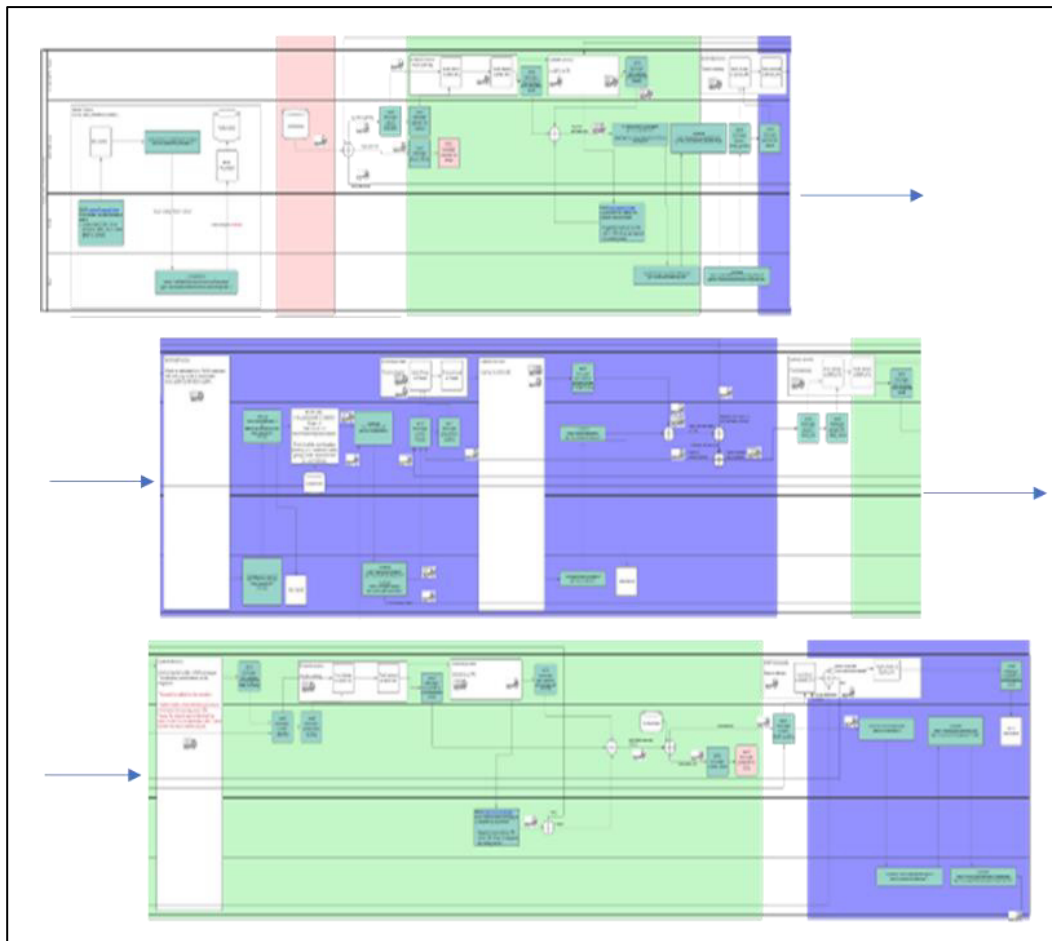


Abbildung 5: Ablaufschema des Zielprozesses in BPMN. Kommunikation zwischen Broker, Truck und den Terminal Operation Systems (COSI und BLU).

Die Prozessstruktur (physische Prozesse und Informationsfluss) ist hierbei wie nachfolgend dargestellt (summarized message flow):

0: Initiierungsprozess: Der BROKER (= DKS) erhält vom DBIS-Disponenten eine Liste mit Referenznummern von Zugoperatoren (Lieferung und Abholung, Annahme einer nicht-leeren Liste), entsprechenden vordefinierten Containernummern (falls vorhanden) und den entsprechenden Kunden-IDs (die Liste wird als Auftragsliste bezeichnet). Der BROKER erhält auch eine Liste reservierter Container (reserviert in COSI).

1a: Der BROKER sendet BLU die Referenznummern, um sie auf Verfügbarkeit zu überprüfen (= Eintrag in BLU vorhanden). BLU sendet OK an BROKER, wenn der Container verfügbar ist.

2: BROKER-Logik: Wenn die Auftragsliste eine Lieferreferenznummer enthält, BROKER zu TRUCK: Fahre zum DBIS-Reachstacker (RS) und bereite das Laden vor. Andernfalls: Gehe zu 3.

2a: Wenn TRUCK am DBIS-Reachstacker ist, erhält der BROKER (nach dem Laden) von COSI: 1 Container C mit Kunden-ID K, abgeholt und bestätigt vom DBIS-Reachstacker.

2b: BROKER-Logik: Vergleiche das Tupel aus Container und Kunde (C, K) mit der Auftragsliste. Wenn der Eintrag (C, K) gefunden wird (dann ist die Containernummer vordefiniert): Der Container kann bedient werden. Andernfalls (dann ist die Containernummer nicht vordefiniert): Vergleiche Container C mit der Liste reservierter Container. Wenn keine Übereinstimmung: Der Container kann bedient werden.

2c: BROKER-Logik: Wenn der Container bedient werden kann, sende an TRUCK: Fahre zu DUSS FG ("Fischgräte").

2d: Wenn TRUCK bei DUSS FG ist: BLU sendet eine Überprüfungs-OK-Nachricht an BROKER.

2e: BROKER an BLU: Fordere entweder 1 oder 2 Krananweisungen an (abhängig von der BROKER-Logik): eine Entladung für den Lieferauftrag und eine Beladung für den Abholauftrag (falls einer in der Auftragsliste ist, BROKER-Logik: willkürlich gewählt).

2f: BROKER zu TRUCK: Gehe zur Entladekranposition und bereite das Entladen vor.

2g: TRUCK / BLU zu BROKER: Ladevorgang ist abgeschlossen.

2h: BROKER-Logik: Wenn es einen Ladekran-Auftrag gibt, BROKER zu TRUCK: Gehe zu dieser Position und bereite das Laden vor. Andernfalls: Gehe zu 2.

2i: TRUCK / BLU zu BROKER: Ladevorgang ist abgeschlossen.

2j: BROKER zu TRUCK: Fahre zu DBIS FG.

2k: Wenn TRUCK bei DBIS FG ist: COSI sendet eine Überprüfungs-OK-Nachricht an BROKER.

2l: BROKER zu TRUCK: Gehe zu DBIS RS.

2m: Nach dem Entladen und OK-Druck von DBIS RS (TRUCK / COSI zu BROKER: Ladevorgang ist abgeschlossen): COSI-Logik: COSI sendet eine Nachricht an BROKER: Wenn "bleiben", gehe zu 2. Wenn "verlassen" gehe zu 3.(Auftragsliste enthält keine Lieferung).

3: BROKER-Logik: Wenn keine Abholreferenznummer in der Auftragsliste ist, BROKER zu TRUCK: gehe schlafen. Andernfalls: BROKER zu TRUCK: Fahre zu DUSS FG.

3a: Wenn TRUCK am DUSS-Eingang ist: TRUCK zu BROKER: Standortinformation senden.

3b: BROKER an BLU: Krananweisung für einen der Abholaufträge anfordern (BROKER-Logik: willkürlich ausgewählt).

3c: Wenn die Krananweisung gesendet wird, BROKER zu TRUCK: gehe zur Kranposition.

3d: TRUCK / BLU zu BROKER: Ladevorgang ist abgeschlossen.

3e: Wenn das Laden abgeschlossen ist: Gehe zu 2j.

Verbunden mit der dargestellten Logik ist die Digitalisierung folgender Dokumente: Transportauftrag ("Umfuhrliste"), Anlieferschein, Ausfuhrschein.

In einer nochmals detaillierteren Ebene, d. h. unter anderem mit Implementierung der Endpoints, stellt sich der Message Flow als Auszug wie folgt dar (detailed message flow with endpoints (EP), communication and marking of physical (real) processes (indicated by X)):

1: Initiation process: The BROKER receives from the DBIS disponent a list of Zugopérateur reference numbers (and type: delivery and pick-up, assume non-empty list), corresponding predefined container numbers (if existent), and the corresponding client IDs (the list is called the order list). The BROKER also receives a list of reserved containers (reserved-inside-COSI).

1.1: BROKER sends a request to the TRUCK about availability status and location. EP: TRUCK 3

1.2: The TRUCK sends location and availability ok. EP: TRUCK 4

K1a: The BROKER sends BLU the reference numbers, in order to check them for availability (=entry inside BLU exists). EP: BLU-e3

1a.1: BLU sends OK to BROKER if the reference number is available. For any list entry there is one OK-signal. EP: BLU 5

2 BROKER logic: If the order list contains a delivery reference number: Else: go to 3.

2.1. BROKER logic: The BROKER system is transferring the transport order and / or the prepare-for-loading signal to the TRUCK:

If TRUCK is at DBIS-RS:

2.1a: BROKER sends prepare-for loading signal to TRUCK (open twist locks, switch on green light): we expect the process to be continued with X.4 (so, logically skip 2.2 and 2.3). EP: TRUCK 1

Else:

2.1.b: BROKER to TRUCK: drive to DBIS-RS-parking lot and prepare-for loading EP: TRUCK 1: go on with X.1.

X.1: TRUCK drives to DBIS-RS

2.2: if TRUCK is outside DBIS-depot: As soon as the TRUCK enters the DBIS-depot, it sends location information to the BROKER application EP: TRUCK 4. If TRUCK is inside the DBIS-depot: skip this.

X.2: TRUCK arrives at DBIS-RS.

X.3: ready-for loading: TRUCK opens twist locks. The TRUCK is switching on a green light as a visual signal to the reach stacker.

2.3: As soon as the TRUCK arrives at RS-parking position and prepared for loading: The TRUCK sends location and ready-for-loading information to the BROKER system. EP: TRUCK 2

...

Der detaillierte Message Flow ist unmittelbar mit der Entwicklung des digitalen Kommunikationssystems verbunden, welches nachfolgend erläutert wird.

2.3 Entwicklung des digitalen Kommunikationssystems und Missionsplanung III

Die Entwicklung eines digitalen Kommunikationssystems (DKS oder Broker) ist erforderlich, um die Kommunikation zwischen Menschen (H2H) in eine Kommunikation zwischen Maschinen (M2M) zu überführen, wodurch zukünftige Prozesse ohne menschliche Beteiligung durchgeführt werden können. Um die Gütekriterien in der Kommunikation zu gewährleisten, wurde sich für den CSL-Standard (siehe dazu weiter unten) entschieden und Deon⁵ als spezifischer Entwicklungspartner integriert.

Das ANITA-Prozesssteuerungs- und Kommunikations-System

Der Zweck des ANITA- Prozesssteuerungs- und Kommunikations-Systems besteht darin, den Prozess des Transports von Containern - vom DBIS-Depot zum DUSS-Terminal und zurück - zu verwalten, unter Verwendung autonomer Fahrzeuge. Dies beinhaltet die Verbindung eines gemeinsamen „Zustands“ zwischen dem DUSS-Organisationssystem (u. a. Kranbetrieb, BLU) und dem DBIS-Containermanagementsystem. Das Terminal in Ulm wird hauptsächlich durch manuelle Prozesse und getrennte IT-Systeme verwaltet. DBIS führt die Containerbestandsverwaltung mit dem von Seeba⁶ entwickelten COSI-System durch, die DUSS organisiert ihre Prozesse auf der Basis des BLU (2)-Systems von Berghof⁷. Das ANITA-Prozesssteuerungssystem zielt darauf ab, die COSI- und BLU-Systeme mit vereinzelt manuellen Prozessen und dem IT-System des digitalen LKW zu verbinden. Ein zentraler Beitrag des ANITA-Projekts ist die vollständige Digitalisierung und Modellierung der Prozesse, die im Terminal eingesetzt werden. Hierfür wurde eine domainspezifische Programmiersprache eingesetzt.

Modellierung von Prozessen mit domainspezifischen Programmiersprachen

Eine domänenspezifische Sprache ist eine Programmiersprache, die - im Gegensatz zu allgemeinen Programmiersprachen - spezifisch für einen Bereich ist. Oft bedeutet dies, dass sie begrenzte Ausdrucksmöglichkeiten oder Funktionalitäten hat. Mit weniger Ausdrucksmöglichkeiten können wir jedoch erweiterte Analysen und Nachverfolgbarkeit von Arbeitsabläufen durchführen. Die Contract Specification Language (CSL)⁸ ist eine domänenspezifische Programmiersprache zur Spezifikation von Verträgen und

⁵ <https://www.deondigital.com/>

⁶ <http://www.seeba.de/index2.html>

⁷ <https://www.berghof-automation.com/en/references/article/digitization-of-container-terminals-with-blu-20>

⁸ Von Deon Digital

Arbeitsabläufen. Sie hat eine "passive" Laufzeit in dem Sinne, dass sie keine Aktionen von sich aus durchführt, sondern nur Ereignisse akzeptiert oder ablehnt. Dies entspricht der intuitiven Vorstellung eines "Vertrags" als etwas, das nicht von selbst handelt, sondern die Regeln festlegt, innerhalb derer eine Gruppe von Parteien handeln muss. Für vollständige Details zu Sprache und Laufzeit siehe die Dokumentation für CSL⁹.

Da CSL eine "kleinere" Sprache als eine vollwertige allgemeine Programmiersprache wie z. B. Java oder C# ist, hat sie einige Eigenschaften, die im ANITA-Prozesssteuerungssystem genutzt werden können. Am wichtigsten ist, dass sie analysiert werden kann: Für einen Prozess in einem bestimmten Zustand kann die Laufzeit uns mitteilen, welche nächsten Ereignisse vom Prozess akzeptiert werden und welche Parameter (und Bereiche) akzeptabel sind. Zum Beispiel, wenn ein LKW mit einem Container am DUSS-Standort angekommen ist, ist der nächste Schritt, die Integrität dieses Containers zu überprüfen; dies führt entweder zu einer Genehmigung und anschließenden Entladung oder zur Ablehnung des Containers, der dann zum Depot zurückgebracht wird. Wenn ein Prozessablauf "ausgeführt" wird, hinterlässt er eine Spur von Ereignissen, die alle in dem Prozess unternommenen Schritte und die beteiligten Personen dokumentiert. Derzeit beinhaltet das System als Ganzes keine Beweise (zum Beispiel eine kryptografisch signierte Aussage, die besagt, dass Mitarbeiter NN den Container genehmigt hat) für stattfindende Ereignisse, aber dies wird grundsätzlich von der Sprache und der Laufzeit unterstützt.

Systemarchitektur

Das folgende Diagramm (siehe Abbildung 6) zeigt einen Überblick über das ANITA-Prozesssteuerungssystem. Der Broker ist verantwortlich für das Handeln auf dem Vertrag, d. h., er entspricht dem CSL-Agenten "Broker", wie oben beschrieben. Er überprüft kontinuierlich die möglichen nächsten Ereignisse, die vom CSL-Vertrag erwartet werden, und ergreift entsprechende Maßnahmen. Wenn er feststellt, dass ein Ereignis für ihn ansteht, wendet er es an und benachrichtigt gleichzeitig das entsprechende externe System darüber. Das bedeutet: Wenn zum Beispiel der Vertrag erwartet, dass der LKW seinen Standort verlässt (zu einem bestimmten Ziel), wendet diese Komponente das Ereignis an und sendet gleichzeitig eine Nachricht an das LKW-System über den Truck Connector. Die interne Architektur im Broker basiert auf Nachrichtenübertragung und suspendierbaren Funktionen, um gemeinsam genutzte Zustände im System zu eliminieren. Dies eignet sich gut dafür, dass der Zustand eines Workflows vollständig in einem instanziierten CSL-Vertrag gekapselt ist, der vom System verwaltet wird.

⁹ <https://docs.deondigital.com>

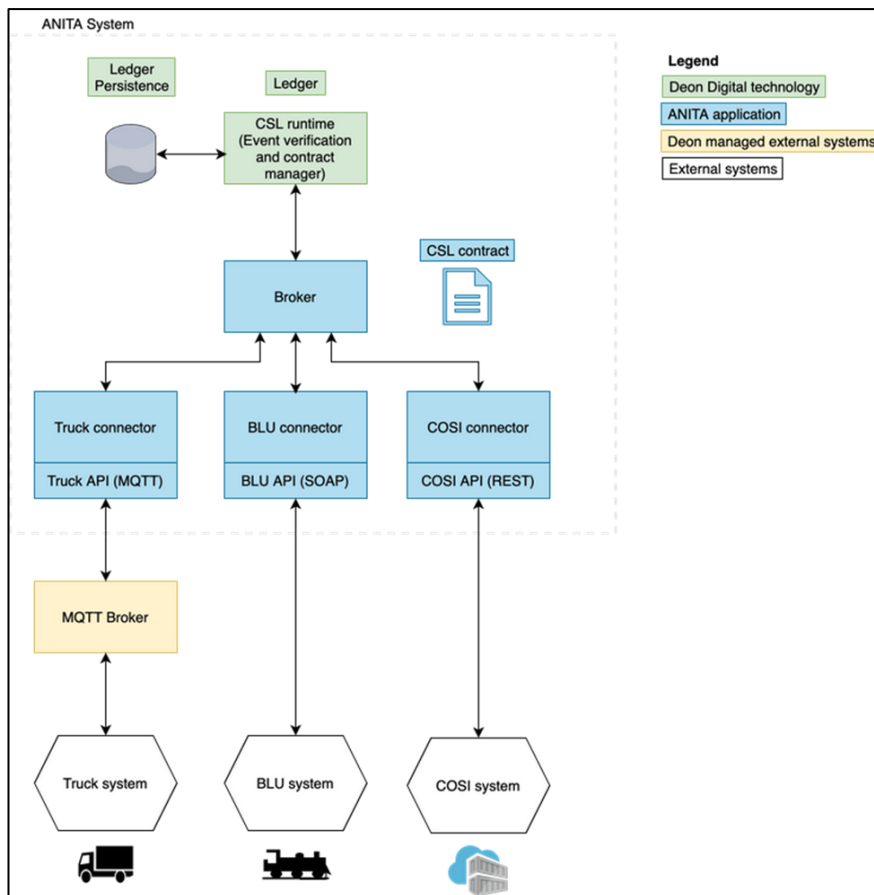


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Brokers (DKS) und der Kommunikation mit den weiteren Agenten und Endpoints.

Endpoints

Jeder der externen Anschlüsse (Endpoints) entspricht einem CSL-Agenten im Vertrag, genau wie die Broker-Komponente. Sie verhalten sich alle ähnlich, indem sie Nachrichten von einem externen System empfangen und diese an die zentrale Nachrichtenschleife der Anwendung weiterleiten. Alle Endpunkte in der Anwendung senden bei jeder Nachrichtenübertragung über REST, SOAP oder MQTT einen Wert an den externen Dienst zurück. Das Ergebnis zeigt an, ob das CSL-Ereignis, das dem Ereignis des externen Dienstes entspricht, auf den Vertrag angewendet werden konnte.

DBIS – COSI: COSI ist das Depotverwaltungssystem für DBIS. Der COSI-Anschluss ist die Schnittstelle zwischen dem COSI-Containermanagementsystem und dem Broker. Es verfügt über eine Reihe von REST-Endpunkten, die vom COSI-System aufgerufen werden müssen.

DUSS – BLU: BLU ist das Terminalorganisationssystem (Container- und Kranverwaltung) der DUSS. Der BLU-Anschluss fungiert als bidirektionale Schnittstelle zwischen dem BLU-Verladebereichssystem und dem Broker. Es stellt einen SOAP-Webservice zur Verfügung, den das BLU-System aufrufen kann, und es erwartet, dass das BLU-System einen weiteren SOAP-Webservice bereitstellt, den es aufrufen kann.

LKW: Dieser Anschluss kümmert sich um den Transport von Nachrichten zu und von dem selbstfahrenden LKW unter Verwendung des Nachrichtenprotokolls MQTT. MQTT verwendet einen zentralen MQTT-Broker, so dass der selbstfahrende LKW mit demselben MQTT-Broker verbunden sein muss, mit dem dieser Anschluss verbunden ist.

Audit-Trail von Ereignissen

Jeder Workflow erzeugt bei der Ausführung eine Spur von Ereignissen, die im ANITA-Prozesssteuerungssystem stattgefunden haben. Diese Ereignisse sind direkt abbildbar auf reale Ereignisse wie:

Ein Container wurde auf einen LKW geladen, oder ein LKW wird beauftragt, zu den DUSS-Kranen zu fahren; aber auch operative Ereignisse wie die Zuordnung von Transportaufträgen zu Kunden-IDs.

Ein Beispiel für eine einzelne Lieferung eines Containers von DBIS zu DUSS kann im folgenden Diagramm (Abbildung 7) gesehen werden.

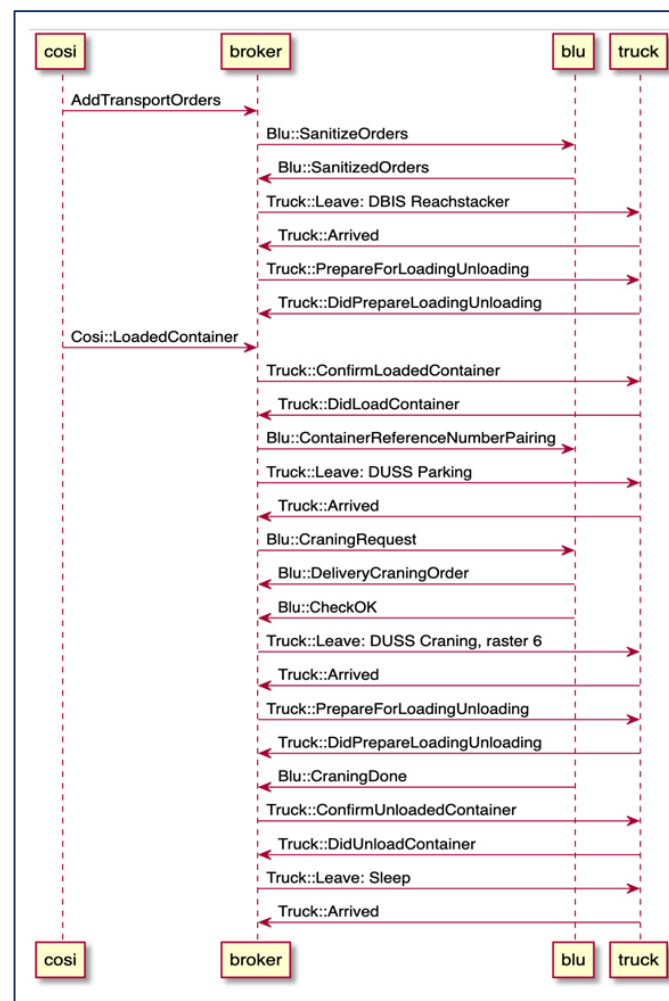


Abbildung 7: Darstellung eines Teils des Kommunikationsprozesses während der Umfuhr.

Hier werden die Teilnehmer durch die Systemnamen statt ihrer Standorte identifiziert, so ist DUSS BLU und DBIS ist COSI. Zu beachten ist, dass dies nur eine spezifische Darstellung der Ereignisspur ist, die Ereignisse selbst enthalten viel mehr Informationen, z. B. Kundeninformationen, Zeitstempel, Containerdaten usw.

Dieser Aufbau ermöglicht es, im System folgende Aspekte abzufragen:

- Wie viel Zeit verbringt der LKW mit Warten im Vergleich zum Fahren?
- Welcher Abschnitt der Straße hat die meisten Staus?
- Ist die Zuweisung von Rasterparkplätzen gleichmäßig verteilt?

Gewählt wurde dieser Aufbau, da er in Effizienz- und Leistungsverbesserungen des gesamten Terminals einfließen und wertvolle Daten für die Prozessoptimierung liefern kann. Dies könnte auch bei der Änderung oder Erweiterung der Terminalinfrastruktur helfen.

Skalierbarkeit und Anpassungsfähigkeit

Die Trennung der Prozessflussdefinition und der Geschäftslogik eignet sich für eine Entwicklungsmethodik, die hochgradig anpassbar ist. Im aktuellen ANITA-Prozesssteuerungssystem sind die implementierten Workflows auf das Terminal in Ulm zugeschnitten. Da sie jedoch in CSL implementiert, getestet und verifiziert werden (CSL bietet hervorragende Testmöglichkeiten), können sie erweitert werden, um Variationen wie mehrere Gleise, mehrere Depots oder LKW mit Anhängern zu umfassen. Diese Anpassung erfolgt in CSL, ohne dass die Geschäftslogik zunächst geändert werden muss, um eine schnelle Prototypentwicklung und Prozessverifizierung zu unterstützen. Dies macht das System hochgradig anpassbar an Veränderungen in den Workflows sowie an neue Workflows.

Da das ANITA-Prozesssteuerungssystem eine nachrichtenbasierte Architektur verwendet, passt es gut zu den Workflows, die als CSL-Verträge formuliert sind, bei denen der Zustand des Workflows dem Vertragszustand entspricht. Dies macht das System vertikal skalierbar, da die Nachrichtenwarteschlangen speicherabhängig sind. Zusätzlich kann der Vertragsmanager über mehrere Serverinstanzen verteilt werden, was das System horizontal skalierbar macht, falls erforderlich. Das System ist so konzipiert, dass es mehrere gleichzeitige LKW im selben Terminal unterstützt, obwohl das ANITA-Projekt in Ulm nur einen verwendet.

Halbautonomes Verhalten

Das System basiert auf einem Nachrichtenbus, der auf eingehende Nachrichten von externen Diensten reagiert. Sobald Nachrichten empfangen werden, werden sie in Ereignisse umgewandelt (die Datentypen, mit denen der CSL-Vertrag arbeitet) und auf den Vertrag angewendet. Dies gewährleistet die Einhaltung des CSL-Vertrags und schafft einen Audit-Trail von Ereignissen. Wenn das Ereignis angewendet werden konnte, wird die Liste der möglichen nächsten Ereignisse, die auf den Vertrag angewendet werden können,

geprüft. Wenn eines der nächsten Ereignisse (vom CSL-Agenten "Broker") angewendet werden kann, wird es durchgeführt und an einen verbundenen externen Dienst gemeldet. Wenn keines der nächsten Ereignisse vom Broker-Agenten erwartet oder durchgeführt werden kann, wartet der Broker auf neue eingehende Nachrichten von den externen Diensten. Dies setzt sich fort, bis es entweder manuell abgebrochen wird oder die Liste der nächsten Ereignisse leer ist, in welchem Fall der Vertrag beendet wird. Der Vorteil dieses Designs ist, dass der gesamte Prozess im CSL-Vertrag enthalten ist. Es ist daher einfacher, den Prozess zu ändern, ohne umfangreiche Codeänderungen vornehmen zu müssen.

Entwicklungsprozess

Die Entwicklung des ANITA-Prozesssteuerungssystems bestand aus einer Reihe von ineinandergreifenden Schritten der Softwareentwicklung und des Anforderungsengineerings bzw. der Systemanalyse. Das resultierende Brokersystem wurde somit iterativ mit den anderen Akteuren (DUSS, DBIS und MAN), abgestimmt und integriert. Hierfür entwickelte Deon Digital Mockup-Versionen aller drei Systeme, sodass jeder Integrationspartner Tests in einer isolierten Umgebung durchführen konnte, die die anderen Systeme nicht beeinflusste (oder Interaktionen von ihnen erforderte). Die Einrichtung und Konfiguration dieser Test-Mockup-Versionen werden später im Detail erläutert.

Einziges Quelle der Wahrheit

Der Aufbau eines Nachrichtenbrokers, der Nachrichten basierend auf dem Zustand des Systems an Teilnehmer verteilt, die ihren eigenen Zustand tragen, kann manchmal Inkonsistenzen verursachen. Dies wird offensichtlich, wenn in den Teilnehmersystemen inkonsistente Daten vorliegen. Zum Beispiel sind nicht alle Containerinformationen sowohl in DUSS als auch in DBIS vorhanden, sodass die Containerdaten nur teilweise validiert werden können, wenn sie von einem Standort zum anderen übertragen werden. Ein Produktivgehen von ANITA würde eine Vereinheitlichung der Daten zwischen den Systemen ermöglichen (eine einzige Quelle der Wahrheit) und nicht notwendige physische Abläufe vermeiden.

Informations-Gatekeeping

Die beiden Integrationspartner DUSS und DBIS sind gewachsene Organisationen mit eigenen Datenhandlings. Um die Effizienz des Terminals im Allgemeinen weiter zu steigern, sollten mehr Informationen an eine Missionsplanungskomponente geliefert werden, weshalb wir in diesem Abschnitt kurz die Anforderungen an die IT-Infrastruktur skizzieren. Die Systeme können nach dem notwendigen Aufwand für die Einrichtung von weniger komplex bis komplexer geordnet werden, und alle Einrichtungsanforderungen sind aufgrund der unterschiedlichen Natur, Anbieter, Betreiber und Eigentümer der externen Systeme unterschiedlich.

COSI: Das COSI-System sendet nur Nachrichten an den ANITA-Broker; der Broker sendet nie Nachrichten an das COSI-System, außer Antworten auf COSI's Nachrichten. Da die gesamte Kommunikation zwischen den beiden Systemen über das HTTP / REST-Protokoll

erfolgt, ist es ausreichend, dass das COSI-System Verbindungen zum ANITA-Broker initiieren kann. Daher muss der ANITA-Broker in einem Netzwerk sein, das von COSI erreichbar ist. COSI hat Zugang zum allgemeinen Internet, daher kann eine öffentliche Internetadresse mit einer einprägsamen DNS verwendet werden.

Der LKW: Nachrichten zwischen dem LKW und dem ANITA-Broker werden mit dem MQTT-Nachrichtenprotokoll gesendet. Dieses Protokoll wurde nach einem Dialog mit dem Entwicklungsteam von MAN gewählt. Sie verwendeten das Protokoll für andere Zwecke in ihren Systemen und hatten gute Erfahrungen damit gemacht. Wenn Systeme Nachrichten über MQTT austauschen, geschieht dies nicht direkt zwischen den Parteien, sondern über einen MQTT-Broker, ein Zwischenserver, der Nachrichten empfängt und an die entsprechenden Clients weiterleitet. Da Nachrichten in beide Richtungen zwischen dem ANITA-Broker und dem LKW gesendet werden, benötigen wir einen MQTT-Broker, der für beide Systeme erreichbar ist. Zu diesem Zweck haben wir eine Instanz einer beliebigen Open-Source-Implementierung eines MQTT-Brokers auf der Cloud-Infrastruktur von Deon eingerichtet.

BLU: BLU sendet ebenfalls Nachrichten an und empfängt Nachrichten vom ANITA-Broker, dies geschieht jedoch über das HTTP / SOAP-Protokoll. Die Tatsache, dass es sich um HTTP handelt, wie bei der COSI-Kommunikation, erfordert, dass eine direkte Verbindung zwischen den Systemen hergestellt werden muss; es gibt keinen Zwischenbroker wie bei MQTT. Das BLU-System befindet sich jedoch in einem geschlossenen Netzwerk, das von DB Netz verwaltet wird, und das System hat keinen direkten Zugang zum Internet und ist auch nicht vom Internet aus erreichbar. Es ist daher notwendig, eine sichere, dedizierte Verbindung zwischen der Infrastruktur von Deon und DB Netz einzurichten.

Setup

Die Cloud-Infrastruktur von Deon für ANITA befindet sich auf der AWS-Plattform. Frühe Versionen des Systems verwendeten den Cloud-Anbieter DigitalOcean, aber aufgrund der Anforderung an die Unterstützung von VPN-Verbindungen wechselten wir zu AWS. Dank des Kubernetes-basierten Setups war dies eine einfache Operation.

Um die Mission zu starten und den Broker in den Einsatz zu bringen, wurde ein Frontend für die initiale Dateneingabe entwickelt, welches nachfolgend in Abbildung 8 dargestellt ist:

TIMELINE		ADD ORDER		ADD ORDERS (JSON)		CSL SOURCE	
Direction Pickup				Reference Number Reference number			
Client number Client id				License Plate license Plate			
Container (optional)							
Container number number	Size (ft) size in feet	Weight weight in Kg	Height height in deci-feet	Type Box			

Abbildung 8: Frontend für die Dateneingabe der Mission.

Zukünftige Arbeiten - Verträge für andere Verkehrsszenarien

Das ANITA-Prozesssteuerungssystem behandelt ein Szenario, den Umfuhrprozess im Ulmer Terminal, indem die Regeln und Prozessabläufe in einem einzigen CSL-Vertrag kodiert werden. Der Rest des Systems fungiert als „Wrapper“ um diesen CSL-Vertrag herum und es ist daher prinzipiell möglich, den Kernvertrag durch einen anderen zu ersetzen, während der Rest des Systems unangetastet bleibt. Solange das grundlegende Vokabular der Ereignisse gleichbleibt und die externen Systeme dasselbe Kommunikationsprotokoll verwenden, sind keine Änderungen außerhalb von CSL erforderlich. Unter der Annahme, dass andere Containerterminals in Deutschland dieselben IT-Systeme wie das in Ulm verwenden und dort ähnliche Prozesse stattfinden, kann der ANITA-Broker auf diese Terminals erweitert werden.

2.4 Testung des digitalen Kommunikationssystems und der Missionsplanung

Die Testung des DKS sowie der damit verbundenen Mission erfolgte über rd. 10 Monate und > 200 angewandten Durchläufen, wobei diese sowohl auf Mockup-Basis (LKW-Mockup, COSI-Mockup und BLU-Mockup) erfolgten als auch mittels der Integration der operativen Systeme bzw. des realen LKW. Ergänzend wurde eine deutlich größere Anzahl an experimentellen Durchläufen durchgeführt. Kernpunkte des Testprozederes war zunächst, dass

- die generierten Informationen an den jeweiligen Endpunkten ankommen / empfangen werden,
- Informations- bzw. Daten-Kongruenz erreicht wird (z. B. eingetragene Containerdaten mit der Erwartungshaltung übereinstimmen),
- die gewünschte (physische) Folgereaktion ausgelöst wird.

In Abbildung 9 ist das Prozessschema mit den im DKS dokumentierten Schritten und Inhalten auszugsweise dargestellt.

Index	Timestamp	Agent	Event
1	2023-09-08T12:29:00Z	cosi	<pre> AddTransportOrders { transportOrders = AddTransportOrdersInput { anitaOrders = [Order { clientId = "client1", orderType = Pickup (Container { height = 86, isoType = Box, number = "DBXU1059059", size = 40, weight = 0 }), referenceNumber = "ANITA5555" }], licensePlate = "AUTONOM1" } } </pre>
2	2023-09-08T12:29:00Z	broker	<pre> Blu::SanitizeOrders { loadingReferenceNumbers = ["ANITA5555"], unloadingReferenceNumbers = [] } </pre>
3	2023-09-08T12:29:00Z	blu	<pre> Blu::SanitizedOrders { orderIdLookup = [ReferenceNumberOrderId { orderId = "601071", referenceNumber = "ANITA5555" }], sanitizedOrders = ["ANITA5555"] } </pre>
4	2023-09-08T12:29:00Z	broker	<pre> Blu::ContainerReferenceNumberPairing { licensePlate = "AUTONOM1", pairings = [ReferenceNumberPairing { container = Container { height = 86, isoType = Box, number = "DBXU1059059", size = 40, weight = 0 }, orderId = "601071", referenceNumber = "ANITA5555" }] } </pre>
5	2023-09-08T12:29:01Z	broker	<pre> Blu::CraningRequest { deloadingReferenceNumber = None, licensePlate = "AUTONOM1", loadingReferenceNumbers = Set::fromList ["ANITA5555"] } </pre>
6	2023-09-08T12:29:01Z	blu	<pre> Blu::PickupCraningOrder { licensePlate = "AUTONOM1", pickupCraningInfo = Blu::PickupCraningInfo { pickupCraningCoordinates = CraningCoordinates { rasterNumber = 5 }, referenceNumber = "ANITA5555" } } </pre>
7	2023-09-08T12:29:01Z	broker	<pre> Truck::Leave { destination = DUSS_CRANING (CraningCoordinates { rasterNumber = 5 }), licensePlate = "AUTONOM1", shouldConfirmArrival = True } </pre>
8	2023-09-08T12:37:43Z	truck	<pre> Truck::Arrived { destination = DUSS_CRANING (CraningCoordinates { rasterNumber = 5 }), licensePlate = "AUTONOM1" } </pre>

Abbildung 9: Auszug der Prozessschritte im DKS.

Der Ablauf der einzelnen Prozessschritte wird jeweils in der Missions-Protokolldatei hinterlegt und kann dementsprechend ausgewertet werden. Weitere Testkriterien unter Einbindung der operativen Systeme betrafen vor allem die Performanz, d. h. wann wurden bestimmte Steps initiiert und wann wurden sie abgeschlossen.

Bei der initialen Testung der Mission konnten, neben anfänglichen Fehlern bzgl. des nicht Erreichens von Informationen am Endpoint, welches in der Regel durch fehlerhafte Konfigurationen erzeugt wurde, vor allem Probleme identifiziert werden, die aus fehlerhaften Dateneingaben (z. B. Containernummern) resultierten. Durch verschiedene Trainingsmaßnahmen konnte dies behoben werden. Weitere Fehler und damit ein Abbruch der Mission konnten entstehen, wenn Teilprozesse, die durch den Menschen zu bestätigen waren, zu früh bestätigt und somit als abgeschlossen deklariert wurden, weshalb der notwendige Anschlussprozess nicht mehr verfügbar war. Auch hier konnte durch Trainings- und Sensitivierungsmaßnahmen eine erhebliche Fehlerminimierung erreicht werden.

2.5 Systemsimulationen und Transformation

Im vorliegenden Projekt ist die Systemtransformation mit wesentlichen Veränderungen in den Prozessen verbunden. Um a priori zu prüfen, von welchen Wirkungen bei einer Transformationsrealisierung auszugehen ist, wurden verschiedene Simulationen aufgebaut, die nachfolgend ausführlich erläutert werden.

2.5.1 Einführung

Generell sind in Terminalsimulationen *kontinuierliche* und *diskrete Ansätze zu unterscheiden*. *Kontinuierliche Ansätze* bedienen sich der Idee, über hochfrequente Berechnungen mögliche Interaktionen zwischen den (teils sehr verschiedenen) Simulationselementen bestimmen zu können (z. B. die wechselseitige Beeinflussung von mehreren Fahrzeugen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten innerhalb von Verkehrsdynamikmodellen). Der Vorteil besteht darin, solche Wechselwirkungseffekte (die nicht von prozessualen Ursprüngen herrühren), z. B. über die mathematische Beschreibung von Differentialgleichungsmodellen, in die Berechnungen einzubetten, vor allem dann, wenn anzunehmen ist, dass diese einen erheblichen Einfluss auf Effektgrößen der Terminalsimulation besitzen. Der Nachteil liegt in der hohen Berechnungslast, da jedes Element über seine eigene Dynamik verfügt und diese durch die Dynamiken der umgebenden Elemente beeinflusst wird, was in jedem Zeitschritt¹⁰ aktualisiert werden muss.

Diskrete Simulationen hingegen ermöglichen es, prozessweise Informationen auszuwerten, und im Gegensatz zu kontinuierlichen Modellen hängt hier die zeitliche Komponente vom

¹⁰ Teilweise in Millisekunden-Schritten

jeweiligen Prozess ab (und nicht vice versa). Hierbei können erheblich größere Zeithorizonte mit wesentlich geringerer Berechnungslast behandelt werden. Allerdings werden außerprozessuale Dynamiken vernachlässigt, was somit in einem grobkörnigeren Modell resultiert.

Die Aufgabe einer adäquaten Erstellung einer Terminalsimulation ist die Einhaltung der Validität, d. h. das Aufsetzen eines wirklichkeitsnahen Modells eines Terminalablaufs¹¹. Hierzu müssen die Prozesse, ihre wechselseitigen Informationsströme und Beeinflussungen, Reihenfolgeeffekte, Parallelprozesse, Ressourcenengpässe, Einschränkungen durch Rahmenbedingungen, bauliche Besonderheiten, zeitvariante Schwankungen, elementspezifische Variationen etc. bekannt und auf Basis eines hinreichend exakten Prozessverständnisses analysiert sein. Terminalprozesse beziehen sich dabei nicht nur auf physikalisch-mechanische Abarbeitungen, sondern ebenso auf menschliche Entscheidungen, die ebenso einen Einfluss auf Prozessdynamiken nehmen können. Dies impliziert, dass neben einem rein mechanistischen Modell ebenso psychologische Faktoren berücksichtigt werden müssen.

Simulationen als Evaluations- und Prädiktionsmethode

Simulationen stellen einen Zugang dar, um die Dynamik von Containerterminals vor dem Hintergrund der Einflussnahme von komplexen Teilprozessen unter realen Bedingungen replizieren und präzisieren zu können (Angeloudis & Bell, 2011; Dragović et al., 2017). Besonders im Bereich der Binnenterminals mit geringeren Investitionsmargen könnten diese einen relevanten Zugang zur Beschreibung und Analyse von gegenwärtigen und zukünftigen Prozessen bieten. Die Modellierung von Terminalprozessen setzt voraus, dass eine umfassende Analyse der Prozessstrukturen, deren Interaktionen und Interdependenzen, Prozesszeiten und ggf. der Ressourcenstruktur angestellt wird. Insgesamt muss demnach eine valide Kenntnis der Abläufe und zeitlichen Komponenten der Prozessschritte zur Modellierung vorhanden sein. Der Begriff der Simulation ist hierbei sehr allgemein zu verstehen (zur Übersicht: Weerasinghe et al., 2023). In einer Übersichtsarbeit von Angeloudis und Bell (2011) werden Simulationsparadigmen von Container-Terminals (CT) nach Dynamik (statisch vs. dynamisch), Simulation Fidelity (mikro- vs. makroskopische Genauigkeit), Scope (generisch vs. fokussiert), Timing (zeitlich kontinuierlich, zeitlich diskret oder eventbasiert) eingeteilt¹².

¹¹ Es ist stets sinnvoll, Terminals mit stochastischen Randbedingungen auszustatten. Über eine Vielzahl an Simulationsergebnissen können so statistische Modelle über die Verteilungen der zu bewertenden Simulationsergebnisse ermittelt werden. Dies lässt zum Schluss eine wahrscheinlichkeitstheoretische Aussage für die Gesamtdynamik zu, welche (wegen der stochastischen Randbedingungen) hinsichtlich der Genauigkeit der Aussagen über die Simulationsergebnisse resilient ist.

¹² Beispielsweise dienen eventbasierte, generische und hinsichtlich der Simulationspräzision eher makroskopische Modelle dazu, auf strategischer Ebene Entscheidungstools für die Abfertigung von Umschlägen unter allgemeinen Randbedingungen bereitzustellen – hier können Methoden aus dem Operation Research für die Optimierung Anwendung finden. [Fortsetzung auf nächster Seite]

Einbindung von automatisierten oder autonomen Verkehrselementen

In verschiedenen CT werden automatisierte Beförderungsfahrzeuge eingesetzt: ECT (Rotterdam), Themsehafen (London), HHLA (Hamburg), PPT (Singapur) (Yang et al., 2004). Die Bewegungen finden in abgegrenzten, streng separierten Bereichen statt (eigene Spuren oder abgesperrte Bereiche), sodass mögliche Interaktionen zwischen autonomen und nichtautonomen Verkehren verhindert werden. Einerseits erhöht dies die Vorhersagbarkeit und Effizienz, andererseits sind hiermit zusätzliche Kosten für die Modifikation der Infrastruktur verbunden. Mit dem Einzug neuerer Technologien wird die Eingliederung autonomer Teilnehmer in den übrigen Verkehr in CT vor dem Hintergrund der Effizienz und der wechselseitigen Einflussnahme der Teilnehmer untereinander diskutiert (z. B. Kezić et al., 2007; Gerrits et al., 2020; Ng et al., 2022).

AGV (Automated Guided Vehicles) bieten Vorteile gegenüber herkömmlichen Systemen, welche insbesondere in der klareren Kommunikation, der Kontrolle, der Prädiktion und der Verhinderung menschlicher Fehler bestehen (z. B. Vis, 2006; Carlo et al., 2014). Andererseits setzen diese eine entsprechende digitale Infrastruktur und u. U. eine vorhergehende Bestimmung und Modifikation internaler Prozesse voraus. Aus zuletzt genannten Gründen ist vor allem die Erstinvestition in solche Systeme mit hohen Aufwänden verbunden. Dem gegenüber steht das psychologische Problem, dass der zukünftige Nutzen automatisierter Systeme teilweise nur schwierig abschätzbar ist und folglich verschiedenste Entscheidungshemmnisse resultieren können.

2.5.2 Simulationen in der Testumgebung I – kontinuierliche Modelle

Die Realumgebung und den Simulationskontext betreffen die Interaktion zwischen den zwei beschriebenen Inlandterminals: Zum einen das Depot der DBIS, welches ausschließlich von Trucks angefahren wird, und zum anderen das Intermodalterminal der DUSS, das den Containertausch zwischen Schienen- und Straßenverfrachtung regelt. Den Kern der einzubindenden autonomen Verkehrsprozesse bildet der Transferprozess zwischen dem Depot und dem Intermodal Terminal (IM), indem Container mittels Transferfahrzeugen zwischen den Terminals ausgetauscht werden. Dieses reduzierte System kann in folgender Abbildung 10 nachvollzogen werden.

¹² [Fortsetzung] Demgegenüber stellen mikroskopische Simulationen, die häufig kontinuierlich oder diskret fein-granulär konstruiert sind, einen Zugang dar, um detailliert die Interaktionen zwischen Terminalabläufen und deren Elementen, wie Fahrdynamiken und stochastische Ablaufzeiten, beurteilen zu können. Frühe Simulationen von Terminalprozessen für intermodale Terminals finden sich z. B. bei Kondratowicz (1990) oder Gambardella et al. (1998). Diese und nachfolgende Simulationsstudien (zur Übersicht: Dragović et al., 2017) basieren auf dem Konzept der diskreten, makroskopischen Systematik.

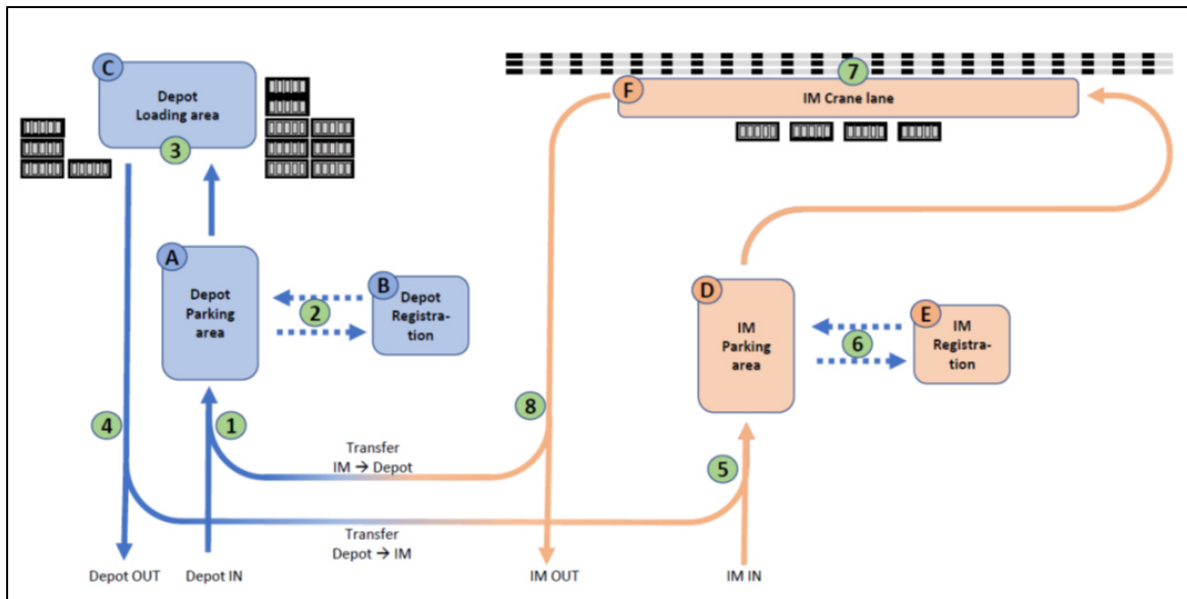


Abbildung 10: Terminalverkehre zwischen Depotterminal der DBIS (blau) und Intermodalterminal der DUSS (hellrot).

Mögliche Kommunikationsorte in der Simulation sind mit (1-8) klassifiziert und die Prozessorte tragen die Nomenklatur (A-F). Ein IM-seitiger Abholauftrag entspricht der Sequenz 5 bis 8 (Beladung), der Transferfahrt IM → Depot und der Sequenz 1 bis 4 (Entladung).

Die Simulation der Terminalverkehre ist auf Basis einer in Python (PyGame) generierten Umgebung mit stochastischen Randbedingungen erfolgt. Über eine Vielzahl an Simulationsergebnissen können so statistische Modelle über die Verteilungen der zu bewertenden Simulationsergebnisse ermittelt werden. Dies lässt zum Schluss eine wahrscheinlichkeitstheoretische Aussage für die Gesamtdynamik zu, welche (wegen der stochastischen Randbedingungen) hinsichtlich der Genauigkeit der Aussagen über die Simulationsergebnisse resilient ist.

In der vorliegenden Arbeit sollen vor allem mikroskopische Prozesse in erster Linie auf Basis der kontinuierlichen Verkehrsflussdynamik (Treiber & Kesting, 2010) kombiniert mit den jeweiligen Dynamiken der Terminalprozesse (diskret eventbasiert) zwischen den Terminals unter verschiedener Nutzung von autonomen Verkehren im Mischverkehr beurteilt werden. In der Terminologie würde dies einem „hybriden CT-Modell“ entsprechen (Li et al. 2016). Die zentrale Frage lautet dabei, inwiefern autonome Verkehre im Mischverkehr einen Einfluss auf die Dynamik der Terminalperformanz ausüben.

Das Verhalten der autonom operierenden Fahrzeuge im Verkehr – wie Beschleunigung, Geschwindigkeit, Reaktionsverhalten etc. – bezieht sich hierbei auf Basis der Fahrdynamikdatenlage von realen autonomen Fahrzeugen. Die als konservativ einzuschätzende Fahrperformanz der autonomen Verkehrsteilnehmer könnte jedoch von den schnellen digitalen Informationsaustauschen zwischen den Terminalprozessen (d. h. Registrierungsprozesse, Check-In-Prozesse etc.) kompensiert werden. Es ist davon

auszugehen, dass insbesondere im Bereich der Straßennutzung von Containerumschlägen vor allem in Hochfrequenzzeiten Interaktionen auf Basis der Theorie der Verkehrsdynamik (z. B. Rückstaubildungen) stattfinden und hierdurch Prädiktionen auf Basis allein von TOS-generierten Aussagen stark begrenzt oder nicht möglich erscheinen.

Allgemeiner Aufbau der Simulation

Die zugrundeliegende Pythonumgebung basiert auf dem Paket PyGame, was die Möglichkeit der Abbildung der Verkehrselemente sowie möglicher Prozesszeiten pro Rechenschritt erlaubt (visuelle Validierung). Die Fahrwege wurden auf Basis einer hochpräzisen Draufsichtkarte graphentheoretisch (d. h. in der Logik von Kanten und Knoten) in einem zweidimensionalen Setting implementiert (im Allgemeinen ist ein Graph ein Paar (E, V) mit der Kantenmenge E (Edges) und der Knotenmenge V (Vertices); im vorliegenden Fall dienen die Knoten als Koordinatenreferenzpunkte, um die Verkehrswege (zu definieren). Die zugehörigen Verkehrsteilnehmer durchlaufen das graphentheoretische Netz in einer eindimensionalen Logik (gerichteter Graph). Insbesondere dient das Intelligent-Driver-Model“ (IDM) als Fahrzeugfolgemodell, um die Dynamik der Interdependenzen zwischen den Verkehrselementen zu koordinieren (Treiber & Kesting, 2010). Innerhalb der CT sind Spurwechselmodelle dabei nicht zu berücksichtigen. Überholvorgänge können jedoch durch infrastrukturelle Gegebenheiten zulässig sein, wie innerhalb der Kranbahn, sonstigen Verladepositionen oder an weiteren Orten, an denen Aufenthalte notwendig werden und unterschiedliche stochastische Wartezeitenmodelle zum Tragen kommen. Weitere Interaktionen finden bei Zusammenführungen von Verkehrswegen statt, bei denen Vorfahrtslogiken Anwendung finden sollen. Das IDM ist ein bewährtes Fahrzeugfolgemodell und basiert auf der Betrachtung der Ortsänderung und Geschwindigkeitsänderung als einfaches Differentialgleichungssystem (Treiber & Kesting, 2010).

Des Weiteren sind in der allgemeinen CT-Betrachtung dynamische Einflüsse (Kranbewegung, Zu- u. Abfahrdynamiken beim Check-In, Vorfahrtsregeln auf öffentlicher Straße), stochastische Einflüsse (Fahrdynamikparameter (d. h. Geschwindigkeit, Beschleunigung, Reaktionszeit), Generierung von Fahrzeugen (Generierungsintervall aufeinanderfolgender Fahrzeuge), Auftrags- und Umfuhrliste (Reihenfolge der Aufträge), Wartezeiten (Verladungen), Prozessierungszeiten (Registrierung, menschliche Interaktionen, Checking), Aufträge von externen Elementen) und konstante Parameter (Anzahl der Umfuhrfahrzeuge, Größe und Zuweisung von Aufträgen) zu berücksichtigen.

Die Gesamtsimulation wurde entsprechend der Realumgebung validiert, worauf nach einer detaillierten Beschreibung der Simulation eingegangen wird.

Detaillierte Beschreibung der Simulation

Für die Inspektion der Simulationsdynamik (z. B. Debugging) wurde eine auf dem Paket PyGame konstruierte Visualisierung auf Basis einer hochauflösenden Draufsichtkarte der Realumgebung beider Terminals und der Verkehrswege generiert (siehe Abbildung 11 mit integrierter Abbildung der zugrundeliegenden Terminalpositionen). Die möglichen Fahrwege

wurden mit der Logik eines direktionalen Graphen implementiert, wobei jede Kante (Strecke) einen Index zugewiesen bekommt. Jedes Fahrzeug besitzt eine individuelle Liste aus diesen Indices für die entsprechende Fahraufgabe, wobei für externe Fahrzeuge verschiedene Fahraufgaben unterschieden werden.

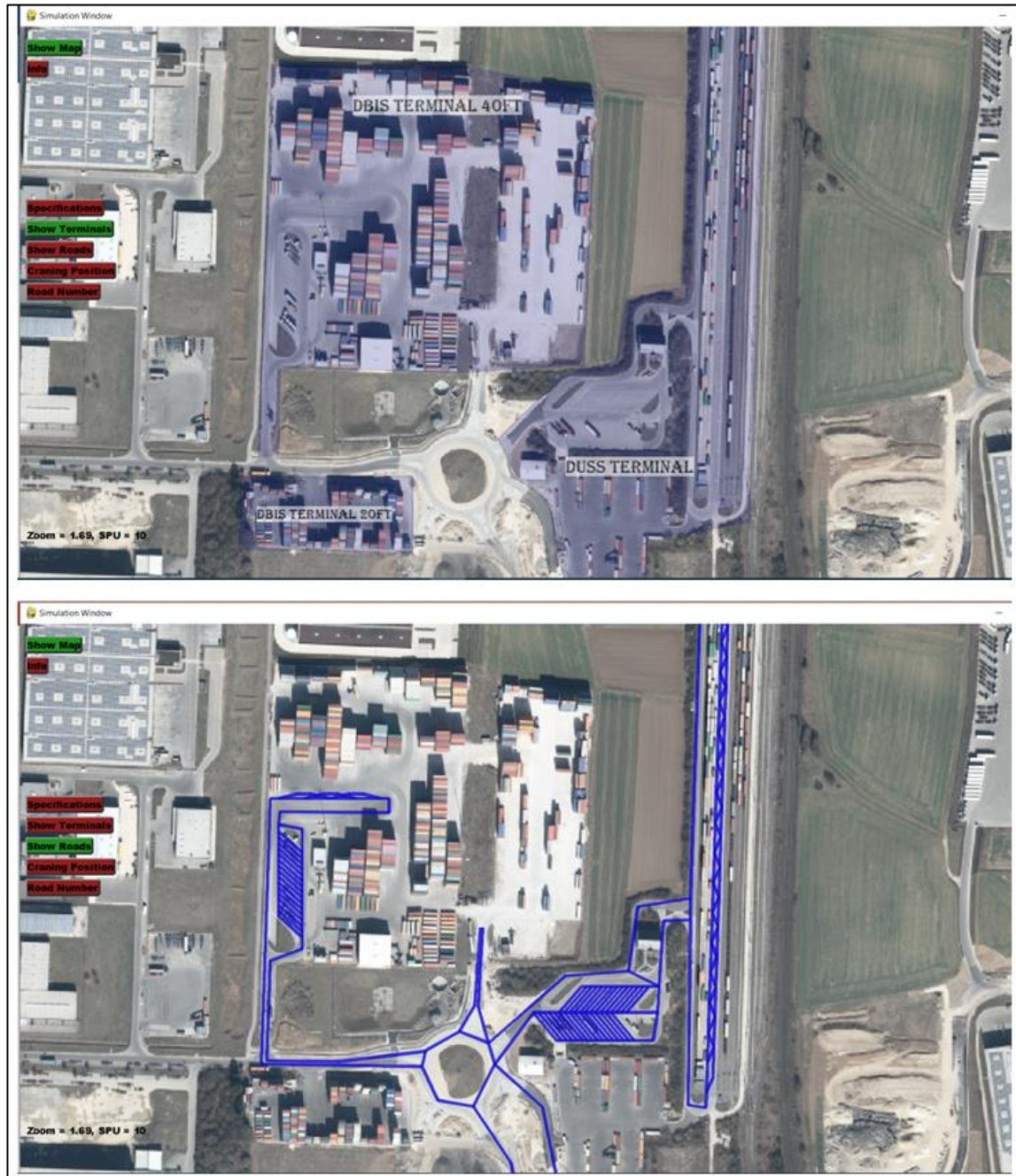


Abbildung 11: Oben: Draufsichtskarte der beiden Containerterminals. Unten: Implementierung des Netzwerkes möglicher Fahrwege.

Die Umfuhrfahrzeuge erhielten nach einem Verteilungsalgorithmus Teilaufträge aus einer prädefinierten Umfuhrliste (die bei Initiierung erstellt wird). Die Umfuhrliste besteht aus einem Quadrupel ausgehend von IN- (ein Container wird bei dem DBIS-Terminal angeliefert) oder

OUT-Aufträgen (ein Container wird bei dem DBIS-Terminal abgeholt) und der Spezifikation, ob die Aufträge von autonomen oder nicht-autonomen Fahrzeugen bedient werden sollen: [Anzahl IN-Aufträge nicht-autonom, Anzahl OUT-Aufträge nicht-autonom, Anzahl IN-Aufträge autonom, Anzahl OUT-Aufträge autonom]. Der Verteilungsalgorithmus teilt die Umfuhrliste in Abhängigkeit der verfügbaren Transferfahrzeuge (autonom und nicht-autonom) in sinnvolle Einheiten, sodass die Anzahl der Leertransferfahrten minimiert wird (d. h. es werden möglichst OUT und IN Aufträge kombiniert).

Die Konstruktion von Fahrzeugen im Zeitverlauf erfolgt mit einem stochastischen Prozess, bei dem die Wartezeiten zwischen den generierten Fahrzeugen eine normalverteilte Zufallsvariable ist. Die Generierung von Transferfahrzeugen (Phase II: Simulationsphase) erfolgt erst, nachdem eine Mindestanzahl (zur Erreichung einer Steady-State-Auslastung je nach Szenario) von externen Fahrzeugen in der Simulation implementiert wurde (Phase I: Initiierungsphase). Des Weiteren kann eine zusätzliche, diskret gleichverteilte Zufallsvariable hinzugefügt werden, die dafür verantwortlich ist, dass externe Fahrzeuge nicht kontinuierlich (nach mittlerer Wartezeit plus Standardabweichung), sondern in Clustern erfolgt. In diesem Fall ergibt sich die Wartezeit innerhalb der Cluster aus der beschriebenen Normalverteilung; wenn eine kritische Zahl (diskret gleichverteilt) überschritten wird, ist die Wartezeit zwischen zwei Clustern eine normalverteilte Zufallsgröße mit größerem Mittelwert. Die Zuweisung der Aufträge erfolgt diskret gleichverteilt.

Fahrzeugdynamiken

Die Fahrzeugdynamiken basieren auf den Parametern des IDM, wobei die Reaktionszeit als gleichverteilte und die Maximalgeschwindigkeit als schief-normalverteilte Zufallsvariable definiert wurden. Beschleunigungs- und Bremsvorgänge wurden als konstant definiert. Die resultierenden Variablen des IDM werden für jeden Rechenschritt (d. h. eTick) und für jedes Fahrzeug berechnet. Zur Berechnung der Distanz zwischen führendem und eigenem Fahrzeug wurde ein zusätzlicher Faktor (kleiner 1) eingeführt, der dazu führt, dass der Wert Alpha des IDM derart modifiziert werden kann, um die für Großfahrzeuge (Trucks o. ä.) typischerweise größeren Abstände anpassen zu können. Für autonome Fahrzeuge wurden konstante Parameter gewählt, die durch die Sensorik determiniert werden.

Die in Abbildung 12 dargestellten Fahrzeuge (Nicht-autonome Fahrzeuge (extern: türkis, Umfuhrfahrzeug: orange)) haben individuelle und je nach Verkehrssituation (bspw. muss vor Kurven die eigene Geschwindigkeit reduziert werden) unterschiedliche Geschwindigkeitsvektoren. Autonome Fahrzeuge (grün) besitzen Geschwindigkeitsvektoren, die im Allgemeinen vom Betrag kleiner sind (konservative Fahrweise gemäß Verkehrsrecht und Sensorik). Nach dem IDM wird das nicht-autonome Fahrzeug die eigene Geschwindigkeit, gemäß des langsameren, vorausfahrenden autonomen Fahrzeugs, verringern (gleiches gilt für einen späteren Zeitpunkt u. U. für nachfolgende Fahrzeuge).



Abbildung 12: Darstellung der individuellen Dynamiken der Fahrzeuge

Terminaldynamiken und -situationen

Der Checking- und Registrierungsprozess im DBIS-Terminal findet an den vorgesehenen Parkplätzen der DBIS statt („Fischgräte“, Abbildung 13). Die Zuweisung von Parkplätzen erfolgt nach einem Algorithmus, der prüft, ob noch bestehende Parkplätze frei sind, und vergibt Plätze hierarchisch (von kleinen zu großen Indices). Die verschiedenen Fahrzeugtypen (Extern versus Umfuhr) müssen unterschiedliche chronologische Schritte beim Check und bei der Registrierung durchlaufen. Externe Fahrzeugführer müssen sich im Real-Fall nach dem Checkprozess (sofern ein Container angeliefert wird) zum Registrierungsschalter begeben, was zu einem Delay durch den Laufweg führt.

Der Checking- und Registrierungsvorgang wird als Cue organisiert, d. h., dass, je nach Anzahl der Checker und Registrierungsschalter (Anzahl modifizierbar), neue Fahrzeuge in Cueing-Listen eingetragen werden, welche nach dem FIFO-Prinzip – first in, first out – abgearbeitet werden. Dies bedeutet, dass fahrzeugspezifische Wartezeiten zusätzlich kumuliert werden. Die Zuweisung von Fahrzeugen zu Checking- und Registrierungsplätzen erfolgt durch diskrete Gleichverteilung. Die Zeiten für die zu durchlaufenden Schritte sind durch Beträge normalverteilter Zufallsgrößen determiniert. Die Gesamtzufallsgröße entsteht aus der Summe der Zufallsgrößen und kann theoretisch, ohne Interaktion zu anderen Fahrzeugen, ähnlich zum Satz von Bienaymé abgeschätzt werden. Die Dynamik ist allerdings durch die wechselseitige Beeinflussung geprägt und erhält daher bei größerer Auslastung einen nicht-deterministischen Charakter.



Abbildung 13: Darstellung zeigt den schematischen Ablauf (braunes Fahrzeug) der Einfahrt (oben), des Checkings und der Registrierung (Mitte) und der Verladung (unten)

Die Verladung innerhalb des DBIS-Terminals erfolgt auf den vorgesehenen drei Verladungsparkplätzen (Abbildung 14). Hierbei werden Beladungs- und Entladungsprozesse mit Hilfe von normalverteilten Zufallsgrößen aus $N(180,30^2)$ bestimmt. Aus der Abbildung 14 (mit starker Frequentierung des Terminals) geht hervor, wie die Platzvergabe und das Verhalten bei belegten Plätzen innerhalb der Ladeparkplätze sowie des Checkbereichs algorithmisch mit Warteschlangen behandelt wird. Warteschlangendynamiken verhalten sich bedingt durch das IDM selbstorganisierend.



Abbildung 14: Exemplarische Dynamik innerhalb des DBIS-Terminals bei hoher Auslastung.

Bei Ausfahrten aus dem DBIS-Terminal müssen bei nicht-autonomen Fahrzeugen die Twist-Locks (Stellverschlüsse der Container-Truck-Verbindung) verschlossen werden, was ebenso durch eine normalverteilte Zufallsgröße $N(120,15^2)$ realisiert wurde. Der zugrundeliegende Algorithmus ist rekurrent implementiert, um auch mehrere Fahrzeuge simultan abfertigen zu können.

Die Systematik im DUSS-Terminal verläuft nach ähnlicher Logik. Fahrzeuge mit Containern müssen einen Check durchlaufen, wohingegen Fahrzeuge ohne Container direkt zum Registrierungsvorgang übergehen können (welcher erneut mit einem Delay durch den Laufweg bestimmt ist). Im DUSS-Terminal ist die Registrierung zu einem Teil (ca. 30 %) durch einen Präregistrierungsprozess ersetzt worden (d. h. Slot-Management-System). Hierdurch sind nur noch Checkzeiten erforderlich. Autonome Umfuhrfahrzeuge bedienen sich ebenso dieser digitalen Infrastruktur. Die Eingangsreihenfolge der Fahrzeuge zum Parkplatz ist nicht nur durch die stochastische Wartetheorie zu Check- und Registrierungsschaltern (ähnlich zu DBIS) für die Unterschiedlichkeit zur Ausgangsreihenfolge verantwortlich, sondern maßgebend durch die Logik der Präregistrierung bestimmt.

Durch den (Prä-)Registrierungsprozess erhalten die Fahrzeuge die spezifischen Be- und Entladeorte innerhalb der Kranbahn (d. h. Raster) mit Indices 1 (südlich) bis 28 (nördlich) zugewiesen. In der Simulation wird dies von einem Mock-Up des Terminal-Operating-Systems BLU durchgeführt. Hierzu werden Raster sektorweise (die Kranbahn wird in drei Sektoren eingeteilt) vergeben, sodass eine realitätsnahe Verladung von Containern über die gesamte Kranbahn erfolgt. Bei OUT-IN-Aufträgen werden zwei Aufträge vergeben.

Die Kräne werden als Fahrzeuge modelliert (mit Brems- und Beschleunigungsverhalten analog zu realen Werten), da die Latenzzeiten durch die auftretende Fahrdynamik auf Wartezeiten beträchtlichen Einfluss nehmen können. In einer ersten Version wird das Einzugsgebiet eines Krans mit dem zugehörigen Sektor kombiniert. In der Tat ist eine Logik, in der mehrere Kräne gemeinsame Einzugsgebiete haben, in der Literatur als Multi-Crane-Problem bekannt und hinsichtlich effizienter interdependenter Arbeitsschritte noch unvollständig erforscht (Bartoli et al., 2020; Briskorn, 2021). Die inhärente Logik zwischen Fahrzeugen und Kränen erfolgt durch Zuweisung von Kranungsaufträgen zu den jeweiligen Auftragslisten der Kräne. Ein Kran setzt sich in Bewegung, sobald ein Fahrzeug an einem Verladeort wartet. Die Kranung selbst ist als $N(90,5^2)$ -Prozess modelliert worden. Da ein Passieren anderer Fahrzeuge während des Kranungsprozesses nach Hausrecht nicht erlaubt ist, wurde ein virtuelles Ampelsystem implementiert, das diese Logik beinhaltet. Bei mehreren Verladungen durch ein Fahrzeug kann es vorkommen, dass ein Raster mit kleinerem Index im Nachhinein verarbeitet werden soll. In diesem Fall muss das Fahrzeug erneut in die Kranbahn einfahren.

Eine exemplarische Dynamik kann in der Abbildung 15 nachvollzogen werden. Während des Kranungsvorgangs dürfen weitere Fahrzeuge nicht passieren (1). Ist der Kranungsvorgang beendet, stellt sich die virtuelle Ampel auf Grün. Fahrzeuge der Fahrspur sind dabei vorfahrtsberechtigt (2-5).

Gleiches gilt für Vorfahrtsregeln innerhalb der Kranbahn. Generell gilt, dass die Fahrspur links der Kranungsspur vorfahrtsberechtigt ist. Dies führt zu verschiedenen komplexen Auflösungen von Verkehrssituationen. Simulationsparameter

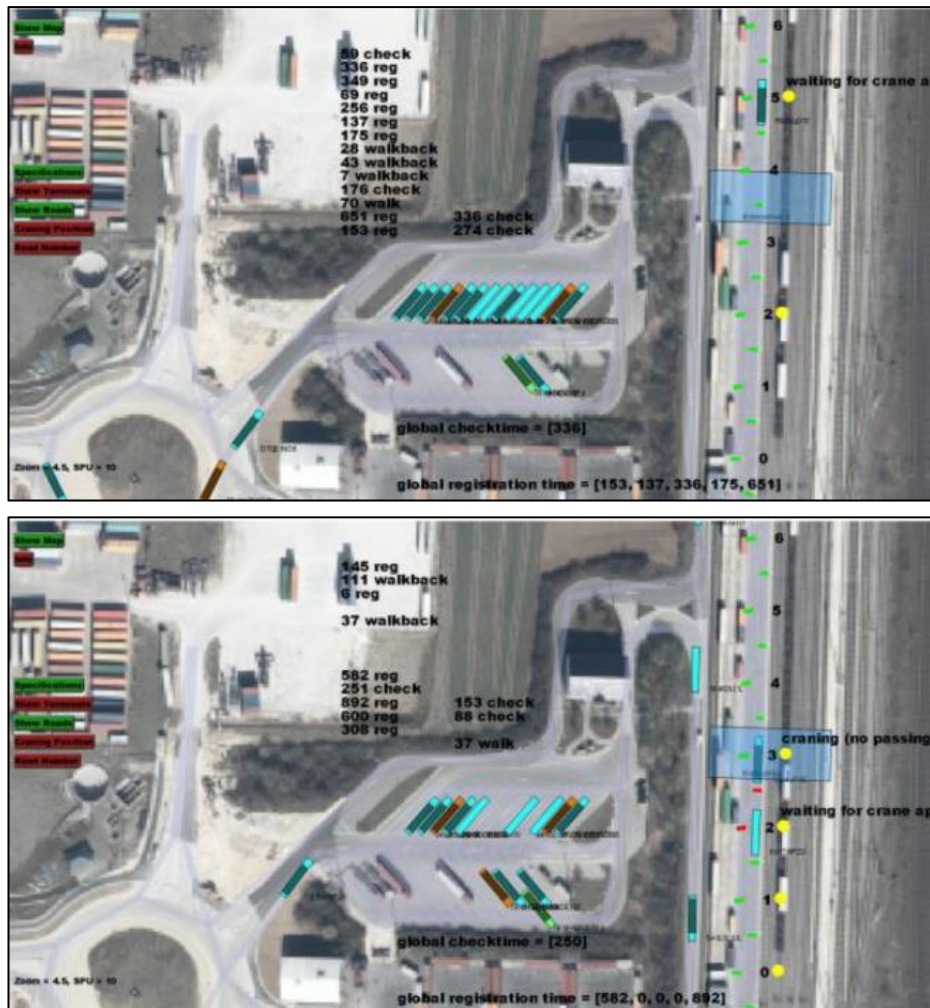


Abbildung 15: Exemplarische Darstellung der Dynamik innerhalb des DUSS-Terminals mit Kran Interaktion.

Die Gesamtsimulation ist von verschiedenen Simulationsparametern abhängig, die in folgender Tabelle 3 dargestellt werden. Prinzipiell soll das Ziel der Simulation sein, bei gegebenen Auslastungsszenarien oder gegebenen infrastrukturellen Situationen Prädiktionen (Durchlaufzeiten, Identifikation von Bottlenecks, Umschläge pro Zeiteinheit, Effizienz von autonomen Prozessen, Evaluation des Mischverkehrs etc.) vornehmen zu können. Die Parameter stellen die Randbedingungen dar, unter denen (z. B. Auslastung der Terminals durch unterschiedliche Frequentierung, variable Verwendung von autonomen Umfuhrfahrzeugen, Einführung von verstärktem Slot-Management etc.) die Performanz der Terminals evaluiert werden.

Tabelle 3: Simulationsparameter zur Einstellung von Randparametern

Parameter- gruppe	Parameter	Funktion
Fahrzeug- generierung	Mittlere Generierungsrate [1/h]	Die Generierung von Fahrzeugen ist ein normalverteilter Prozess (für DBIS und DUSS separat einstellbar). Die Generierungsrate gibt die Auslastungsszenarien der Terminals vor.
	Standardabweichung der Generierungsrate [1/h]	
Phase I Parameter	Anzahl generierter externer Fahrzeuge (DBIS und DUSS separat einstellbar)	In Phase I werden externe Fahrzeuge mit variablen Arbeitsaufträgen generiert, die die Terminals bis zu einem Steady-State auslasten. Nach dieser Phase werden Umfuhrfahrzeuge generiert.
Phase II Parameter	Anzahl der Umfuhrfahrzeuge (autonom und nicht- autonom)	In Phase II werden neben den externen Fahrzeugen zusätzlich Umfuhrfahrzeuge für die Warteliste generiert. Die Anzahl der autonomen und nicht-autonomen Fahrzeuge ist einstellbar.
	Wahrscheinlichkeit Generierung Umfuhrfahrzeuge	Die Umfuhrfahrzeuge sollen nach einer bernoulliverteilten Zufallsgröße generiert werden. Dies soll verhindern, dass eine größere Anzahl von Umfuhrfahrzeugen simultan generiert wird.
	Transferliste	Die zu bearbeitende Transferliste [# IN nicht autonom, # OUT nicht autonom, # IN autonom, # OUT autonom]
Global- parameter	Simulationszeit [s]	Gesamtzeit für einen Simulationsschritt
	Simulationsschritte	Gesamtzahl der Simulationsschritte

Validierung

Mikroskopische Validierung ist auf Basis der raum-zeitlichen physikalisch-geometrischen Verknüpfung erfolgt. Längenangaben sind auf Basis einer hochauflösenden Karte der realen KV-Umgebung gegeben. Die raum-zeitliche Validierung ist anhand einer Transformation der Frames unter Berücksichtigung der Längenvalidierung durchgeführt worden. Aus den Frames pro Simulationssekunde und der validierten Längenskalierung ergeben sich real skalierte Geschwindigkeiten. Die Fahrzeugeigenschaften der autonomen und nicht-autonomen Teilnehmer wurden aus technischen Daten gewonnen.

Die makroskopische Validierung betrifft die infrastrukturelle Dynamik, d. h. die zu operierenden Aufträge pro Zeiteinheit und sonstige einflussnehmende Faktoren auf die Verkehrsdynamik, wie Standzeiten, Registrierungs- und Anmeldevorgänge, Verladungsprozesse etc. Diese Dynamik unterliegt verschiedenen Schwankungen, die auf unterschiedlichen Zufallsprozessen basieren. In einem ersten Schritt wurden die zugrundeliegenden Prozesse durch beteiligte Mitarbeiter erfragt und systematisiert, in nachfolgenden Arbeitsschritten wurden Datenbankeinträge in den betreffenden TOS analysiert.

Ergebnisse

Je nach Simulationsansatz bzw. -ziel können unterschiedliche Ergebnisse extrahiert werden. Eine Auswertung basiert auf einem Versuchsplan, welcher in einem 3x5 Design (3 Terminalauslastungen: niedrig, mittel, hoch und 5 Anzahl (1-5) der autonomen Transferfahrzeuge) angeordnet ist (siehe auch Lau 2023). Da die Simulation von verschiedenen stochastischen und dynamischen Mechanismen abhängig ist, können reliable Ergebnisse erst bei multipler Simulation erwartet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Implementierung von autonomen Fahrzeugen in den Mischbetrieb des Containerterminals zu einer Reduzierung der Aufenthaltszeiten bei der DUSS von ca. 30 % führt. Dieser Nutzen ist auf die digitale Infrastruktur zurückzuführen und entfällt bei der DBIS. Das defensivere Fahrverhalten der autonomen Fahrzeuge im Vergleich zu den nicht-automatisierten Fahrzeugen führt dazu, dass die reinen Fahrzeiten der autonomen Transferfahrzeuge ansteigen und bei einem hohen stabilen Verkehrsaufkommen die nicht-automatisierten Fahrzeuge ausbremsen. In Folge eines Verkehrszusammenbruchs (Staus) besteht die Möglichkeit, dass es bei der DBIS aufgrund des Rückstaus von den Verladeplätzen zum Parkplatz zu einer "Freeze"-Situation bei den autonomen Transferfahrzeugen kommt. Dies resultiert aus dem defensiverem Fahrverhalten, insbesondere wenn es darum geht, sich in den quasi stehenden Verkehr einzufädeln, welches eine offensivere Fahrweise benötigen würde. Eine Ausdehnung der digitalen Anmeldeprozesse auf nicht-automatisierte Fahrzeuge könnte weitere Zeiteinsparungen zur Folge haben, gleichzeitig aber auch dazu führen, dass ein Flaschenhals in Richtung der Umschlagplätze verschoben wird. In Abbildung 16 sind die Fahrzeugreisezeiten der DUSS aus der Simulationsstudie bei mittlerer Auslastung dargestellt. Die verschiedenen Cluster unterscheiden sich in der Anzahl an autonomen Transferfahrzeugen (4 autonome in Cluster 1, 3 autonome und 1 nicht-autonomes

Transferfahrzeug in Cluster 2 usw.). Die farbliche Unterteilung ist der Legende zu entnehmen. Die signifikant kürzeren Fahrzeugreisezeiten der autonomen Transferfahrzeuge auf dem Gelände der DUSS sind insbesondere auf die digitale Infrastruktur zurückzuführen.

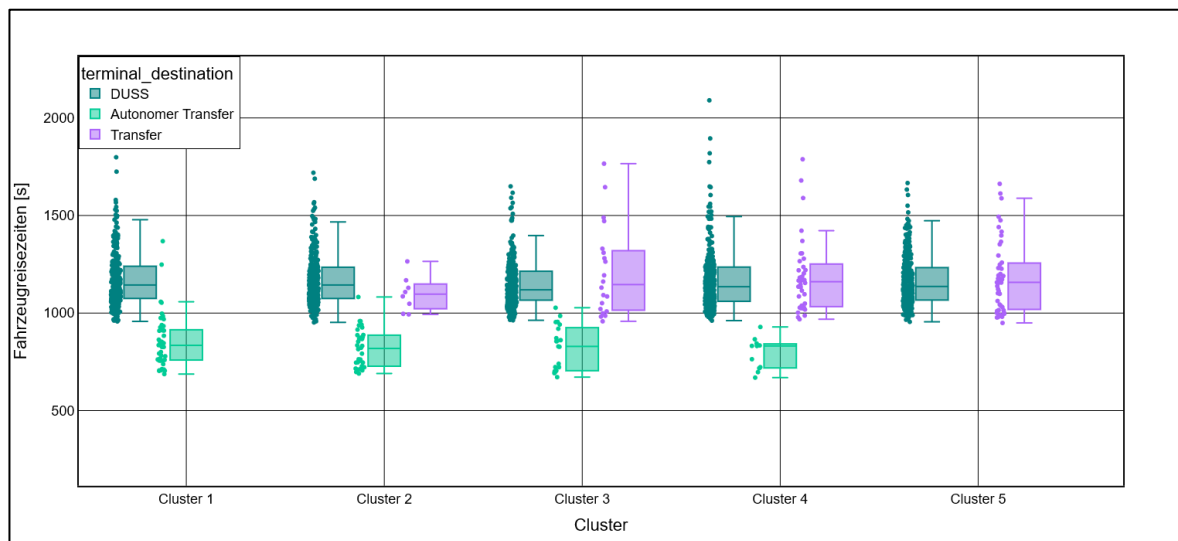


Abbildung 16: Boxplot der Fahrzeugreisezeiten auf dem Terminalgelände der DUSS in Ulm.

In Abbildung 16 erfolgt eine Unterteilung in verschiedene Auftragsstypen (autonomes Transferfahrzeug, nicht-autonomes Transferfahrzeug und externe Fahrzeuge zur Anlieferung / Abholung (DUSS)). Die Cluster unterscheiden sich in der Aufteilung in autonome und nicht-autonome Transferfahrzeuge (4 autonome in Cluster 1, 3 autonome und 1 nicht-autonomes Transferfahrzeug in Cluster 2 usw.), wobei die Menge an Transferfahrzeugen konstant auf 4 gehalten wurde.

Bei der zusätzlichen Implementierung eines automatisierten Checking-Prozesses durch eine Kamerabrücke würde dies zu einer weitgehenden Automatisierung der Terminals führen und die Performanz des Terminals wäre maßgeblich von der Effizienz der Kräne und dem Lagermanagement abgänglich. Der Einsatz der autonomen Transferfahrzeuge sollte dann zu den Nebenzeiten erfolgen, um die Terminalkapazität nicht zu überlasten.

2.5.3 Simulationen in der Testumgebung II – diskrete Modelle

Diskrete Simulationsmodelle eignen sich dafür, große Zeithorizonte mit vergleichsweise geringer Rechenlast zu simulieren. Diese Modelle vernachlässigen rechenaufwändige Interaktionen mit anderen Agenten und rechnen mit diskreten Ereignissen. Terminalsimulationen können somit nahezu in Echtzeit durchgeführt werden und ein Forecasting für erwartete Ressourcenengpässe geben. Insbesondere bei einer geringen Auslastung von Terminals kommt es seltener zu Interaktionen zwischen den Fahrzeugen. Die Aufenthaltszeiten werden somit hauptsächlich durch die Interaktion der Fahrzeuge mit den Randbedingungen (Check, Anmeldung, Verladung) beeinflusst. Jedem dieser

Ereignisse liegt eine definierte Ressourcenverfügbarkeit zu Grunde. Eine Ressource sind Elemente der Simulation, welche nur begrenzt zur Verfügung stehen (z. B. Anzahl der Parkplätze, Anzahl der Checker, Anzahl der Anmeldeschalter, Anzahl der Kräne, Anzahl der Kranungsraster etc.). Wenn eine Ressource vollständig ausgeschöpft ist, müssen nachfolgende Agenten eine definierte Zeit warten, bis diese wieder verfügbar ist. Beispielsweise muss ein LKW auf dem Kranungsraster so lange auf seinen Verladeprozess warten, bis alle vor ihm befindlichen Fahrzeuge ihren Vorgang abgeschlossen haben und der Kran wieder zur Verfügung steht.

The screenshot shows a web application titled 'Terminal Simulation'. On the left is a sidebar with navigation links: Home, Ressourcen, Infrastruktur, and Ergebnisse. The main content area is titled 'Einstellen der Ressourcen'. It features three tabs: 'Checkingprozess' (active), 'Registrierungsprozess', and 'Kranungsprozess'. Under the 'Checkingprozess' tab, there are three settings: 'Anzahl der Checker' with a dropdown menu showing '2', 'Varianz der Checkingzeit' with a dropdown menu showing 'Gleichverteilt', and 'Checkingzeit [s]' with two input fields containing '60' and '120'. At the bottom of the sidebar are two buttons: 'Clear Results' and 'Run Simulation'.

Abbildung 17: Graphisches Userinterface zum Einstellen der Ressourcen.

Im oben dargestellten Userinterface (Abbildung 17) lassen sich verschiedene Parameter einstellen, wie bspw. Anzahl der Checker, Dauer des Checks und Art der Varianz. Die gleichen Einstellungen können außerdem für den Registrierungs- und Verladeprozess vorgenommen werden. Weitere Einstellungsparameter wie Slot-Management oder Gefahrgutcontainer sind im Backend hinterlegt.

Solche diskreten Simulationssysteme können durch die Kombination eines Simulations-Backends mit einem benutzerfreundlichen Frontend der breiten Masse zugänglich gemacht werden. Für die Berechnung kann beispielsweise die Python Bibliothek Simpy verwendet werden. Der Aufbau der Simulation erfolgt dann durch das Aneinanderreihen von Prozessen, die entweder infrastrukturell bedingt sind (z. B. Fahrstrecke von Einfahrt zum Anmeldeschalter) und Prozessen, die Ressourcen benötigen (z. B. Containercheck und Anzahl der Checker). Da interprozessuale Dynamiken nicht beachtet werden (sondern durch einen Repräsentanten ersetzt werden), können diese Art von Simulationen mit geringem Aufwand an neue Umgebungen angepasst werden. Sämtliche Zeiten oder Fahrgeschwindigkeiten können individuell stochastisch zugewiesen werden. Ein

exemplarisches Userinterface zur Eingabe der Ressourcen ist in der Abbildung 17 dargestellt.

Die Ergebnisse tragen zu einer effizienten und planbaren Steuerung einzelner Terminalprozesse und deren Ressourcen bei. Somit können frühzeitig Ressourcenengpässe identifiziert und Maßnahmen eingeleitet werden. Als Basis können entweder historische Auslastungsdaten (vgl. Abbildung 18) oder prognostizierte Auslastungsszenarien verwendet werden. Die Auslastungskurven zeigen an den unterschiedlichen Wochentagen ähnliche Muster und Ausprägungen, unterscheiden sich aber teilweise in der absoluten Zahl der Umschläge.

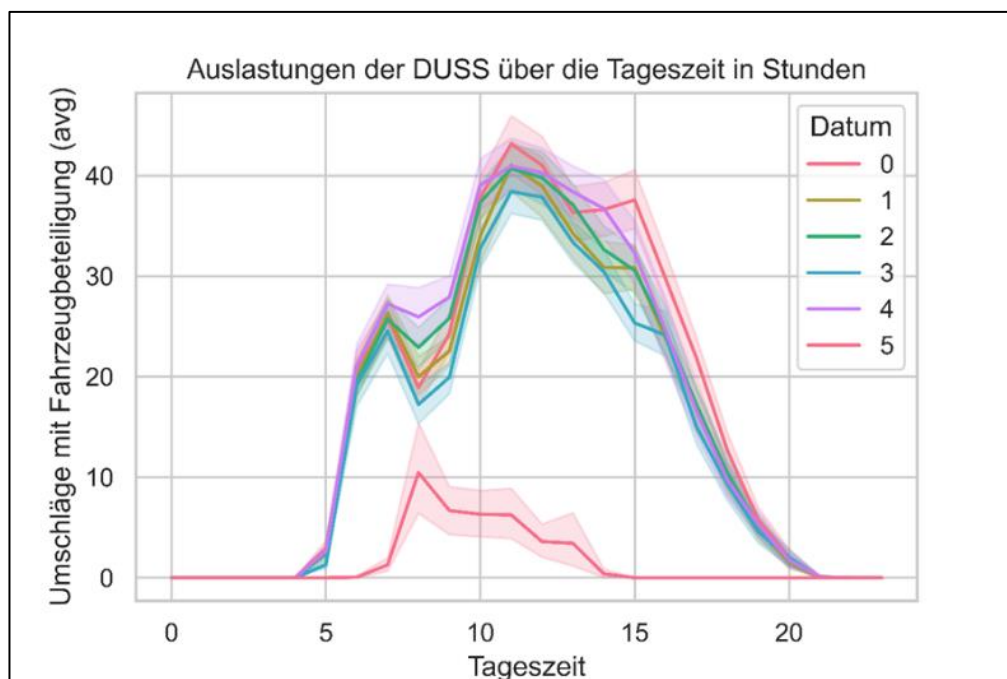


Abbildung 18: Auslastungen der DUSS in Ulm (nur Umschläge mit Fahrzeugbeteiligung) auf der Basis von historischen Daten, aufgeteilt nach Wochentag.

Die nachstehenden Abbildungen (Abbildung 19 bis Abbildung 22) veranschaulichen beispielhafte Szenarien, in denen die Umverteilung von Arbeitskräften aus dem Containercheck, der Anmeldung oder der Verladung die Entwicklung der Wartezeiten beeinflussen kann und zu einer Verlagerung von Bottlenecks führt. In diesen Abbildungen ist der Verlauf der Wartezeiten innerhalb eines beispielhaften Arbeitstages dargestellt. Die Ressourcenverfügbarkeit (Anzahl der Checker, Anmeldeschalter, Verladekräne) sind den Abbildungsbeschriftungen zu entnehmen.



Abbildung 19: In diesem Szenario ist der Verlauf der Wartezeiten im Normalfall von 2 Checkern, 4 Anmeldeschaltern und 3 Kränen zu sehen.

Zur Mittagszeit kommt es – wie in Abbildung 19 gezeigt - vereinzelt zur vollständigen Auslastung und damit verbundenen Wartezeiten von etwa 150 s beim Check und 500 s bei der Anmeldung.



Abbildung 20: Dieses Szenario zeigt den exemplarischen Verlauf bei dem Wegfall von einem Anmeldeschalter. Die Anzahl der Checker (2) und der Kräne (4) entspricht dem Normalfall.

Ab der Mittagszeit gegen 12:00 Uhr kommt es – wie in Abbildung 20 gezeigt - durch die Veränderung im Anmeldebereich zu einer Kumulation der Wartezeiten von bis zu 5000 s.



Abbildung 21: In diesem Szenario wurde die Anzahl der Checker von 2 auf 1 reduziert. Die Anzahl der Anmeldeschalter (4) und Kräne (3) entspricht dem Normalfall.

Durch die Veränderung in Abbildung 21 verlagert sich das Bottleneck auf den Checkingprozess mit Wartezeiten von bis zu 1200 s.



Abbildung 22: In diesem Szenario wurde die Anzahl der Verlademöglichkeiten auf 1 Kran reduziert. Die Anzahl der Checker (2) und Anmeldeschalter (4) entspricht dem Standard.

Das in Abbildung 22 gezeigte Szenario führt zu einer Verlagerung des Bottlenecks zur Kranbahn.

2.5.4 Simulationen in der Testumgebung III – Deontische Operatoren

Die zukünftige Gewährleistung eines effizienten Verhaltens eines autonomen Fahrzeugs bedingt nicht nur eine solide Missionsplanung, sondern auch die Ermöglichung einer eigenständigen Interpretation von Verkehrsregeln. Hierbei, d. h. bei der Übermittlung von Handlungsmaximen an ein selbstfahrendes Fahrzeug, empfehlen sich keine starren Vorgaben bzw. kein harter Programmieransatz, da sich geeignete Verhaltensweisen aus dem Zusammenwirken von unterschiedlichen, z. T. hierarchisch angeordneten Regelsets ergeben. Stattdessen bietet sich die Nutzung der deontischen Logik an. Hierbei verwenden wir eine Formalisierung dieser Logik, die – um einer eindeutigen und übersichtlichen

Kurzform wollen – gewissen Repräsentanten die wichtigsten deontischen Grundbegriffe zuordnet, die wir fortan als deontische Operatoren bezeichnen: Erlaubnis, Pflicht und Verbot bzw. **P**=„permitted“, **O**=„obligatory“, **F**=„forbidden“.

Im Sinne einer vollumfassenden Digitalisierung der deutschen StVO muss nun jede einzelne explizite Regel (und auch implizite), in geschlussfolgerte Handlungsleitsätze bzw. in geeignete deontische Operatoren übersetzt werden. Für diese deontischen Operatoren kann eine Vorabkategorisierung sinnvoll sein, um verschiedene Systeme des selbstfahrenden Fahrzeugs mit den dieses System betreffenden deontischen Weisungen zu versorgen. Ein explizites Beispiel für solch eine Vorabkategorie ist beispielsweise die Kategorie „Geschwindigkeit halten / anpassen“, die folgenden deontischen Operatoren zuzuordnen sind:

O (langsamer / schneller als x zu fahren), x:= Schwellwert

F (Geschwindigkeit x zu über- / unterschreiten), x:= Schwellwert

O (Geschwindigkeit an unübersichtliche Verkehrslage anpassen)

O (Geschwindigkeit halten)

P (schneller als die Richtgeschwindigkeit zu fahren)

An diesem Beispiel wird auch schnell deutlich, dass eine Regel mit verschiedenen deontischen Operatoren äquivalent ausgedrückt werden kann. Es gelten folgende Operatoren-Äquivalenzen:

$F(p) \leftrightarrow O(\neg p)$

$O(p) \leftrightarrow F(\neg p)$

Welcher Ausdruck für welche Regel zu bevorzugen ist, ist im Einzelfall abhängig von den für das Verständnis der Regeln im Fahrzeug hinterlegten Routinen auszuwählen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde ein Ansatz für das Verständnis von Verkehrsregeln gewählt, der jede hypothetische Verkehrssituation als ein Verkehrszeichen oder eine Kombination mehrerer Verkehrszeichen darstellt. Als Basis des zugrunde liegenden Regelkatalogs wurde jedes Verkehrszeichen der deutschen StVO in deontische Operatoren übersetzt. Die sich hierbei gemäß der Operatoren-Äquivalenzen ergebenden verschiedenen Darstellungsweisen jeder Regel wurden jeweils beide mit in den Katalog aufgenommen. Unbedingt zu berücksichtigen ist jedoch die Priorisierung jeder einzelnen Verkehrsregel: Es gilt folgende Hierarchie, bei der Verkehrsregeln aus einer Kategorie mit höherem Aufzählungswert Verkehrsregeln aus einer Kategorie mit niedrigerem Aufzählungswert überschreiben:

- 1) generelle Verkehrsregeln wie gegenseitige Rücksichtnahme und Fahren mit an die Verkehrssituation angepasster Geschwindigkeit;
- 2) Verkehrsregeln, die auf bestimmten Straßen gelten, wie beispielsweise Tempolimit 50 km/h im Innerortsverkehr;

- 3) Verkehrsregeln, die durch statische Verkehrszeichen festgelegt werden, wie z. B. eine Vorfahrtsbeschilderung an einer Kreuzung;
- 4) Verkehrsregeln, die durch dynamische Verkehrszeichen festgelegt werden, wie z. B. dynamische Tempolimits und Überholverbote durch LED-Schilderbrücken auf Autobahnen oder Ampelanlagen an einer Kreuzung und
- 5) Weisungen durch Verkehrspolizisten.

Ein Polizist kann beispielsweise die Vorfahrt an einer Kreuzung entgegen der Ampelanlage oder etwaiger Vorfahrtsschilder regeln. Das Fahrzeug muss in der Lage sein, die korrekte Priorität jeder Regel zuzuordnen und bei widersprüchlichen Regeln stets die ranghöhere Regel anzuwenden.

Gelingen die richtige Zuordnung und Gewichtung der Verkehrsregeln für das autonome Fahrzeug, so birgt dieser Ansatz nichtsdestotrotz auch gewisse Anforderungen (ggf. auch Nachteile): Das autonome Fahrzeug ist lediglich in der Lage, Verkehrsregeln zu befolgen, die im Sinne eines Operators eingepflegt wurden. Eventuelle Neuerungen der StVO (oder anderer Ordnungen) erfordern stets manuelle Nacharbeiten. Eine weitere Herausforderung – in Anlehnung an das oben genannte Beispiel – besteht darin, umweltbedingt einzuordnen, was bspw. als eine „geeignete“ Geschwindigkeit gilt. Die Verantwortung einer geeigneten Auswahl liegt dabei nicht bei der Verkehrsregelinterpretation, sondern beim Fahrzeug, welches einer gewissen Sensor-Kritikalität unterliegt. Der Ansatz des deontischen Regelansatzsatzes besteht lediglich darin, dass dem Fahrzeug mitgeteilt wird, dass es obligatorisch ist, die Geschwindigkeit auf ein geeignetes Maß anzupassen und das Feedback des Fahrzeugs abzuwarten, dass die Anforderungen erfüllt sind und es somit weiterfahren kann.

Betrachtet man die Implementierung der automatisierten Interpretation von Verkehrsregeln aus einer systemtheoretischen Sicht, so ergeben sich weitere Konsequenzen für den Verkehrsfluss. Hierfür haben wir exemplarisch zwei konkrete Verkehrssituationen des Containerterminals von Ulm in eine zeitkontinuierliche Verkehrssimulation implementiert und im Anschluss verschiedene Vorfahrtsregeln hinterlegt, die situativ während der Laufzeit der Simulation umgeschaltet werden können. Es handelt sich hierbei um den Kreisverkehr zwischen DBIS und DUSS, sowie um die Einmündung der DBIS in die Straße „Himmelweiler“ (siehe Abbildung 23).

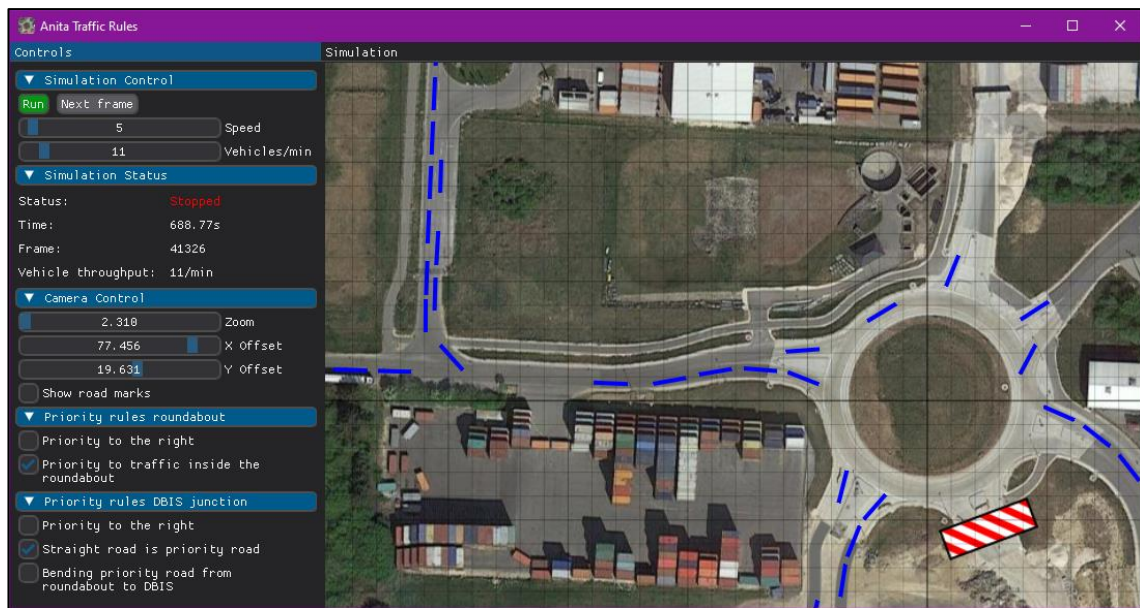


Abbildung 23: Auszug aus der Verkehrssimulation mit dem Einstellen der Parameter.

Links befinden sich neben einer Anzeige für wichtige Statusparameter der Simulation und der Möglichkeit, die Simulation zu pausieren sowie Frame für Frame einzeln durchzuschalten und die Kameraperspektive zu verändern auch die Optionen zur Umschaltung der Vorfahrtsregeln in Kreisverkehr und Einmündung. Man hat beim Kreisverkehr die Wahl zwischen der nativen Vorfahrtsregel „rechts vor links“ sowie der Vorfahrt für Verkehrsteilnehmer innerhalb des Kreisverkehrs. Bei der Einmündung kann man neben „rechts vor links“ sowie der Vorfahrt für die durchgängige Straße noch eine abknickende Vorfahrtstraße zwischen DBIS und der Zubringerstraße zum Kreisverkehr auswählen.

Verschiedene Simulationsdurchgänge zeigen, dass die Vorfahrtsregel „rechts vor links“ den schlechtesten Verkehrsdurchsatz mit sich bringt. Im Kreisverkehr kann es zum vollständigen Stillstand kommen, wenn dort kein Platz für weitere einfahrende Fahrzeuge mehr ist. Ebenso existieren in der Einmündung bei „rechts vor links“ Szenarien, die für autonome Verkehre nicht lösbar sind, z. B., wenn von allen Seiten Fahrzeuge kommen und das von Westen aus der Straße „Himmelweiler“ kommende Fahrzeug nach links abbiegen möchte. Da der Linksabbieger der einzige Verkehrsteilnehmer ist, aus dessen Sicht niemand von rechts kommt, wäre er gemäß „rechts vor links“-Regel vorfahrtsberechtigt. Weil er aber nach links abbiegen möchte, muss er Vorfahrt an den Gegenverkehr gewähren, welcher wiederum Vorfahrt an das von der DBIS kommende Fahrzeug gewähren muss, welches wiederum Vorfahrt an ihn gewähren muss. Die „rechts vor links“-Regel führt zur Pattsituation. Bei manuell gelenkten Fahrzeugen würde in dieser Situation per Handzeichen o. ä. kommuniziert, sodass ein Agent auf die Vorfahrt verzichtet und damit der Verkehr weiterfließen könnte. Im Rahmen der automatisierten Interpretation von Verkehrszeichen und Verhaltensregeln existiert jedoch keine Lösung für solche Probleme, da Pattsituationen ohne konkrete Verkehrsregeln nicht darstellbar sind und die selbstfahrenden Fahrzeuge (aktuell) keine aktive Kommunikation für Kompromisse besitzen.

Die anderen Möglichkeiten zur Vorfahrtsgestaltung haben solche Nachteile nicht, sie sind per se lösbar. Es zeichnet sich ein maximaler Fahrzeugdurchsatz der Verkehrsinfrastruktur von 11/min ab, was deutlich größer als der tatsächlich vom Containerterminal abgearbeitete Fahrzeugdurchsatz ist.

Wählt man also einen geeigneten Regelsatz für den Verkehrszeichenansatz, so kann mit ihm eine zuverlässige Abfertigung der Fahrzeuge durch die Verkehrsinfrastruktur erreicht werden. Es muss allerdings darauf geachtet werden, dass zuvor ein vollständiger Satz deontischer Operatoren für alle Regeln, die in der Verkehrssituation zutreffen können, vorliegt, damit das Fahrzeug allen Verkehrszeichen und wie Verkehrszeichen interpretierten Ausgangssituationen passende Verhaltensweisen zuordnen kann. Auf außerplanmäßige Störungsfälle, die eben nicht als Kombinationen von Verkehrszeichen interpretiert werden können, kann das System allerdings keine eigene Reaktion finden, für solche Fälle ist weiterhin die Anwesenheit eines Operators (ggf. auch menschlichen Fahrers) gefragt.

Die oben dargestellten Szenarien lassen sich auch von deontischen Operatoren auf CSL-Verträge operationalisieren. Eine grundlegende Regel kann als einfacher CSL-Vertrag konstruiert werden, der behauptet, dass eine Bedingung eines Ereignisses gilt. CSL-Verträge sind zusammensetzbar, wie logische Operatoren und andere algebraische Ausdrücke, und wir bauen komplexe Verträge, die komplexe Regel- / Workflow-Sets kodieren, zusammen, indem wir kleinere Verträge zusammensetzen. Wenn wir also ein grundlegendes Vokabular von Verkehrsaktionen und zugehörige Zuordnungen zu CSL definieren würden, könnten wir Verträge bilden, die generische Verkehrsbedingungen kodieren. Darüber hinaus könnte es unter bestimmten Umständen wünschenswert sein, die rohe CSL-Kodierung vor einem Endbenutzer zu verbergen, z. B. wenn dieser keinen technischen Hintergrund hat und dennoch die Kontrolle über den Prozess haben muss. Ein solcher Benutzer könnte stattdessen mit den reinen deontischen Ausdrücken präsentiert werden – vielleicht als natürlichsprachlicher Text dargestellt.

Herausforderungen des hier skizzierten Ansatzes

Die CSL-Laufzeit steuert nicht das autonome Fahrzeug oder andere Systeme, die an einer Verkehrssituation teilnehmen, und sie kann kein spezifisches Verhalten auf ein dysfunktionales oder fehlerhaftes System erzwingen.

Die Rolle des Vertrags darin besteht, die Aktionen der beteiligten Parteien zu überwachen und bei Bedarf Anweisungen zu erteilen – genau wie das ANITA-Missionsplanungs-System. Unter der Annahme, dass Systeme sich nicht fehlverhalten und eine Aktion tatsächlich durchgeführt haben, wenn sie dies behaupten, würde dieses System wie ein zentraler Manager der Regeln und Arbeitsabläufe einer gegebenen Verkehrssituation agieren, analog zum ANITA-Missionsplanungs-System. Die zweite Herausforderung hängt mit der ersten zusammen, denn sie betrifft die Festlegung des Vokabulars, das die beteiligten Systeme verwenden. Die Identifizierung des richtigen Abstraktionsniveaus, das verschiedene

Fahrzeugtypen einschließt, aber gleichzeitig auch ausreichend Sicherheitsspezifisch ist, stellt die dritte Herausforderung dar.

2.6 Lessons Learned

Die Analyse der Logistik- und Terminalprozesse offenbart eine Reihe von Herausforderungen und Verbesserungsansätzen, die einerseits die hohe Dynamik in den Vertragsbeziehungen und Prozessen sowie andererseits die Notwendigkeit einer flexiblen und adaptiven Prozessgestaltung unterstreichen. Es wird deutlich, dass die Logistikbranche stark von globalen wirtschaftlichen Trends beeinflusst wird, was eine flexible Kapazitätsplanung unerlässlich macht. Zudem erfordern die sich ständig ändernden Anforderungen eine kontinuierliche Anpassung und Modernisierung der Terminalstrukturen.

Besondere Herausforderungen ergeben sich durch die heterogenen Kommunikationsstrukturen zwischen den Akteuren. Hier besteht eine hohe Notwendigkeit einer Standardisierung und Vereinheitlichung, sowohl von Datenstrukturen als auch bzgl. der Informationsübertragung, welches sich wahrscheinlich hoch positiv auf eine Minimierung von Trouble Handlings und somit auch auf positiv auf die Systemperformanz auswirken würde. Da es sich bei vielen Transport- und Logistik-Systemen um (Infra)-Strukturen handelt, sind vollständige Standardisierungen, die sich ebenfalls auf die Prozesse beziehen, kaum zu erreichen. In diesem Kontext bietet das Konzept des „Organic Computing“ vielversprechende Ansätze, um Systeme zu entwickeln, die sich dynamisch an veränderte Bedingungen anpassen und eigenständig optimieren können. Konkret bedeutet das, dass nur die Übergaben zwischen den „Organen“ standardisiert und kontrolliert werden. Was innerhalb der Organe erfolgt, wird jedoch der Selbstorganisation überlassen, wodurch regionale oder auch lokale Lösungen möglich sind, ohne die Grundstruktur aufzugeben. Hierdurch wird die Verbindung zwischen generalisierenden und spezifizierenden Ansätzen geschaffen. Didaktisch bietet sich an dieser Stelle die Implementierung des „Deontic Reasoning-Ansatzes an. Im Gegensatz zu einer Abfrage von (komplexen) Prozessen bietet eine konkrete Abfrage (von Mitarbeitenden im Feld), „was an welcher Stelle **O**(obligatory), **F**(forbidden) oder **P**(permitted) ist oder sein sollte“, die gute Möglichkeit, sehr konkrete und sinnhafte Antworten zu erhalten. Diese können weiter zu organischen Prozessen zusammengefügt werden und auch die lokalen Besonderheiten und implizite Abläufe repräsentieren. Ergänzend erscheint es sinnvoll, den Aspekt des „Computational Thinking“¹³ stärker zu beleuchten und zu entwickeln. Dies ist u. a. deshalb von Bedeutung, da eine Prozessumgestaltung oder -neugestaltung in der Regel schneller zu bewerkstelligen ist als

¹³ Computational Thinking bezieht sich auf die Anwendung von Problemlösungsansätzen, die aus der Informatik und der Kognitionsforschung stammen. In der Logistik umfasst dies die Zerlegung komplexer Probleme in kleinere, handhabbare Teile (Dekomposition), das Erkennen von Mustern und Gemeinsamkeiten (Mustererkennung), das Abstrahieren von Details zu allgemeineren Lösungen (Abstraktion) und das Entwerfen von Algorithmen zur Problemlösung.

ein Umbau der Infrastruktur. Eine Umgestaltung kann notwendig sein, wenn bestimmte Kennwerte eines Systemkontrollparameters grenzwertig werden (Anzahl von Ladeeinheiten, Verfügbarkeit von Kranen oder Staplern etc.) und somit zu einem Kippen des Systems führen können.

3 Fahrzeugentwicklung (MAN Truck & Bus SE, Götting KG)

Die Zielsetzung dieses Arbeitspakets besteht darin, einen prototypischen autonomen LKW zu entwickeln und aufzubauen, der in den realen Logistikbetrieb integrierbar ist. Die funktionellen Anforderungen umfassten das Abdecken des geforderten Funktionsspektrums, einschließlich des Be- und Entladevorgangs sowie die Verarbeitung terminalspezifischer Schnittstellen, die in AP 1 beschrieben wurden. Ebenfalls zu berücksichtigen waren Sicherheits- und Robustheitsanforderungen. Neben der Ermöglichung des Piloteinsatzes wurde auch der Schritt in Richtung Industrialisierung des automatisierten Fahrens angestrebt. Die Auswahl und Auslegung von Hard- und Software zielten auf deren Technologieverwertbarkeit im Hinblick auf eine mögliche Industrialisierung ab. Dies wird im Folgenden beschrieben.

3.1 Konzeption von Fahrzeug und Software (AP 2.1)

In den folgenden zwei Kapiteln zur Konzeptionsphase der Hardware- und Softwarearchitektur wurden die Projektanforderungen, das Testszenario und die Umfeldbedingungen im Ziel-Einsatzgebiet genau analysiert. Ziel war es, die Anwendung und das Einsatzgebiet genau zu kennen, um daraus notwendige Anforderungen an den Versuchsträger ableiten zu können.

3.1.1 Konzeption der Fahrzeugarchitektur (AP 2.1.1)

Der ANITA-Versuchsträger basiert auf einem MAN-Serienfahrzeug (Basisfahrzeug). Mit diesem ist das Automatisierungssystem an verschiedenen Stellen verbunden, um Signale abzugreifen bzw. bereitzustellen. Die Architektur für das Automatisierungssystem berücksichtigt daher die des Basisfahrzeugs und ist auf die Struktur der Steuergeräte und Bussysteme zugeschnitten. Im Projekt wurde eine Ist-Analyse der Basisfahrzeug-Architektur durchgeführt und die Automationskomponenten an das Basisfahrzeug angepasst.

Auf Basis bestehender Konzepte aus vorangegangenen Projekten wurden Potenziale zur Vereinfachung und Weiterentwicklung identifiziert. So wurden Anforderungen an die Rechnerhardware hinsichtlich Schnittstellen, Leistung des Hauptprozessors (Central Processing Unit – CPU), Grafikkarten-Leistung, Datenraten, Speicherbedarf sowie Kühlleistungsbedarf abgeleitet und ein geeignetes System definiert. Weiter wurde ein geeignetes Wasserkühlungssystem ausgewählt.

Die in den verschiedenen Modulen erarbeiteten Teilkonzepte wurden zu einer Gesamtarchitektur integriert, was beispielsweise die Einplanung eines dedizierten „ANITA-CAN“-Busses sowie die Definition und Planung der Sensor-Anbindung beinhaltet. Ein wesentlicher Bestandteil von ANITA war die Weiterentwicklung von Automatisierungstechnologie in Richtung einer Serienanwendung. So sind Teile der

Automatisierungssoftware auf Steuergeräte-Mustern getestet worden, was gegenüber der Nutzung von Industrie-PCs einen wesentlichen Schritt in Richtung Serienentwicklung darstellt. Hierfür wurden in der Hardware-Architektur sowie bei der Kühllungsauslegung Vorhalte für Steuergeräte-Muster eingeplant. Nach einer Analyse der Komponenten-Datenblätter wurden außerdem detaillierte Schaltpläne für die zur Automatisierung notwendigen Komponenten angefertigt.

Die Fahrzeugentwicklung erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Partner Götting KG. Die von Götting entwickelten Funktionen greifen auf die Sensordaten der MAN-Systeme zurück und sind in einem virtualisierten Container auf MAN-Hardware implementiert. Auch die hierfür benötigten Schnittstellen wurden in der Architektur vorgesehen und im restlichen System eingeplant.

Die Leistungsaufnahme und damit die Anforderungen an die Stromversorgung des konzipierten Automatisierungssystems übersteigen jene eines Serienfahrzeugs deutlich. Aus diesem Grund wurde auch eine geeignete Generatorlösung für den Versuchsträger erarbeitet.

Der Versuchsträger ist das zentrale Arbeitsmittel im Rahmen der Technologieentwicklung und -erprobung. Eine wichtige Anforderung an selbigen sind daher die Wartbarkeit sowie zweckmäßige Platzverhältnisse im Innenraum, die ein effizientes Arbeiten im Team ermöglichen. Für die neue MAN Fahrzeuggeneration, welche die Basis für den ANITA-Versuchsträger darstellt, wurde daher das bisherige Innenraumkonzept weiterentwickelt. Das neue Konzept sieht vier – statt bisher drei – Sitzplätze vor, wobei zwei Sitze im Fond des Fahrerhauses angeordnet sind. Die elektronischen Komponenten des Automatisierungssystems wurden in vertikaler Anordnung hinter dem Fahrer- und Beifahrersitz verbaut.

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, die unterschiedlichen Anforderungen aus den verschiedenen technischen Modulen zu vereinen, damit ein Versuchsträger aufgebaut werden kann. Die verschiedenen Herausforderungen der einzelnen Module wurden berücksichtigt. Die in diesem Kapitel beschriebenen Konzepte und Schaltpläne waren die Basis für die gesamten elektrischen Arbeiten am Fahrzeug. Durch diese Konzeptionsphase wurde eine sinnvolle und möglichst robuste Fahrzeugarchitektur entwickelt.

3.1.2 Konzeption der Softwarearchitektur (AP 2.1.2)

In ANITA wurde eine Softwareentwicklungsplattform entwickelt, welche eine spätere Weiterverwendung des Codes im Rahmen einer Industrialisierung ermöglicht. Hier wurde an einem Konzept gearbeitet, welches diesen Anforderungen genügt. Es beinhaltet u. a. die Tools, die auf Entwicklungsrechnern zum Schreiben des Codes und zum Einbinden bestehender Bibliotheken verwendet werden, wie die Verwaltung des Codes in Repositories auf Servern erfolgen soll, sowie die Vorgehensweise für das Deployment, d. h. das Aufspielen des Codes auf die Fahrzeugrechner.

Eine bestehende Softwarearchitektur aus Vorgängerprojekten wurde hinsichtlich der Anforderungen in ANITA geprüft und an einer weiterentwickelten Soll-Architektur gearbeitet. Neben diversen Optimierungen in der Struktur und den Schnittstellen, beinhaltet diese neue Soll-Architektur zusätzliche Softwaremodule im Bereich der Lokalisierung (Eigenortung), in welchen die Funktionen zur Lokalisierung im nicht-statischen Umfeld der Kranspur im DUSS-Terminal verortet sind.

Es konnte eine Applikation für eine Vorserien-Hardwareplattform kompiliert und auf diese installiert werden. Zusammen mit einem beauftragten Entwicklungsdienstleister wurde ein bestehendes Softwaremodul auf die neue Softwareentwicklungsplattform portiert.

Die von Götting entwickelten Funktionen „Hinderniserkennung zur Kollisionsvermeidung“ und „Lokalisierung von Sattelaufliegern“ sind an verschiedenen Stellen an das restliche Automatisierungssystem angebunden worden. So benötigen die Funktionen Sensordaten als Eingang und geben Ausgangssignale an die Module Motion Control bzw. Bewegungsplanung weiter. Diese Schnittstellen wurden gemeinsam mit Götting definiert.

3.2 Fahrzeugaufbau (AP 2.2)

Im Folgenden wird auf die Integration der entwickelten Hard- und Softwarekomponenten, inklusive Testing, eingegangen.

3.2.1 Integration (AP 2.2.1)

Als Basis für den ANITA-Versuchsträger dient ein Serienfahrzeug, das mit einem Automatisierungssystem ausgerüstet wurde (Versuchsträgeraufbau). Hierfür wurde eine auf das automatisierte Fahren abgestimmte Fahrzeugkonfiguration erarbeitet und ein entsprechendes Fahrzeug bestellt. Die Abbildung 24 zeigt das eingerüstete Automatisierungssystem in der LKW-Fahrerkabine.



Abbildung 24: Angepasster Innenraum des Fahrzeugs.

Der Anwendungsfall in ANITA umfasst den Transport eines 40-Fuß-Containers. Ein entsprechendes Chassis sowie ein Container wurden beschafft und mit einem Motiv versehen, welches die ANITA-Inhalte verdeutlicht. Die nachfolgende Abbildung 25 zeigt Chassis samt Container bei einer Messfahrt im DUSS-Terminal mit einem Vorläufer des späteren Versuchsträgers, der im Rahmen von ANITA für Entwicklungsarbeiten genutzt wurde.



Abbildung 25: Chassis und Container bei einer Messfahrt im DUSS-Terminal.

Die mechanischen und elektrischen Arbeiten, die von MAN Truck & Bus durchgeführt wurden, sind im partnerspezifischen Bericht von MAN detailliert beschrieben.

3.2.2 Komponententest (AP 2.2.2)

Dieses Arbeitspaket beinhaltet die Durchführung der Integrationstests. Die Tests mit dem neuen Versuchsträger wurden im Jahr 2022 gestartet und wurden bis Projektende in regelmäßigen Abständen durchgeführt. Sie waren notwendig, um die für die Funktionsentwicklung notwendigen Software-Updates zu überprüfen. Die Testfahrten fanden sowohl auf dem MAN-Testgelände als auch in Ulm statt. Hierbei wurden auftretende Hardware- und Softwarefehler frühzeitig erkannt und behoben, um das Fahrzeug auch für die Pilotphase und das Abschlussevent in Ulm vorzubereiten.

3.3 Funktionsentwicklung (AP 2.3)

Das Arbeitspaket Funktionsentwicklung umfasste die Entwicklung von Algorithmen zum automatisierten Fahren sowie deren Implementierung. Dabei wurde auf bestehenden Softwaremodulen aufgebaut, welche basierend auf den Anforderungen in ANITA weiterentwickelt und erweitert wurden. Die Aufteilung in die Module Sensorik und Perzeption, Bewegungsplaner, Motion Control, Human Machine Interface (HMI) und Vehicle-to-Everything-(V2X-)Kommunikation, die auch in Abbildung 26 dargestellt ist, ermöglichte eine Parallelisierung der Arbeiten. Auf diese Arbeitspakete wird in den folgenden Kapiteln eingegangen. Die letzten beiden Kap. 3.3.4 und Kap. 3.3.5 und betreffen die Automatisierungsbausteine, die zusammen mit Götting entwickelt wurden.

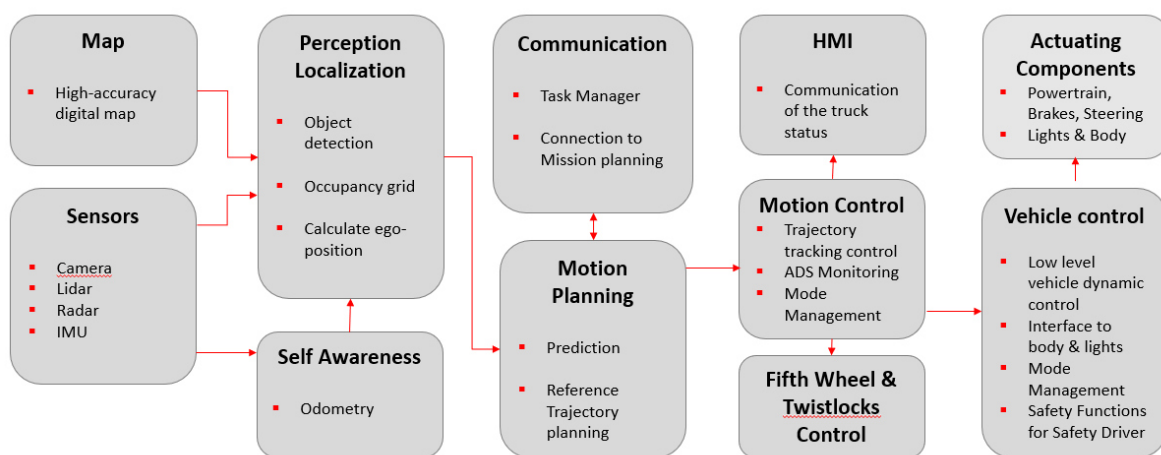


Abbildung 26: Funktionale Module des automatisierten Systems.

3.3.1 Sensorik und Perzeption (AP 2.3.1)

Sensorsetup

Das Sensorsetup sieht Kamera-, Lidar- und Radarsensoren vor und umfasst darüber hinaus Inertialsensoren und GPS-Empfänger.

Zur Ableitung der Anforderungen an mögliche Sensoren wurden generische Abdeckungsbereiche für die Sensormodalitäten Lidar, Radar und Kamera definiert; diese sind unterteilt in Long-, Mid- und Shortrange. Hieraus konnten eine Sensoranzahl zu jeder Modalität sowie die grundsätzliche Einbauposition abgeleitet werden. Zusammen mit Überlegungen zu praktikablen Einbauvorgaben – hier spielen bei der Einbauhöhe beispielsweise der Fußgängerschutz oder mögliche Sensorschäden durch aufgewirbelte Steine eine Rolle – ergab sich ein generisches Sensorsetup, bestehend aus Sensortyp (z. B. Short Range Lidar), Einbauposition und zugehörigen Anforderungen etwa an den Öffnungswinkel oder die Auflösung des Sensors.

Die Entwürfe des Setups konnten durch Simulationen plausibilisiert und optimiert werden. Die nachfolgende Abbildung 27 zeigt die Visualisierung einer solchen Simulation. Links die normale Ansicht, rechts die zugehörige Simulation von Lidaren und ihrem Erfassungsbereich.

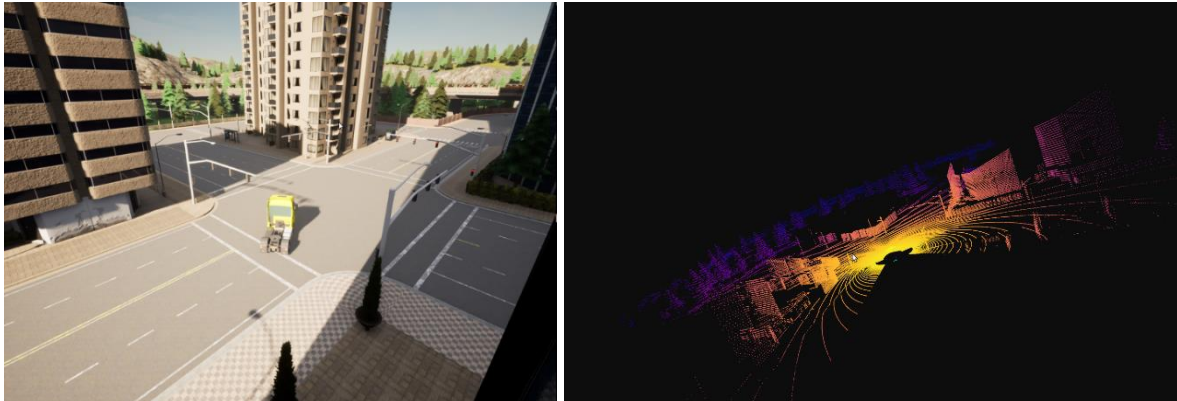


Abbildung 27: Links: Normale Ansicht. Rechts: Zugehörige Simulation.

Zeitsynchronisation

Für eine korrekte Fusion von Kamera und Lidar müssen die Sensordaten zeitlich zueinander passen. Die Kamera muss immer dann auslösen, wenn der Lidar durch den Bildmittelpunkt wandert. Die zeitliche Synchronisation der verbauten Lidarsensoren ist in Abbildung 28 dargestellt. Grundlage ist dafür ein hochgenauer Zeitgeber, der als separates Modul in das Fahrzeug eingerüstet wurde. Über das in Betrieb genommene „Precision Time Protocol“ (PTP) werden alle Computer und Sensoren mit einer Genauigkeit im Nanosekundenbereich synchronisiert. Dabei mussten auch Kompatibilitätsprobleme der Hardware auf Netzwerkprotokollebene gelöst werden. Mit der Synchronisation wurde eine entscheidende Voraussetzung für die eine Low-Level-Fusion geschaffen, da ohne präzise Zeitstempel weder die Kamera-Lidar-Synchronisation noch eine sinnvolle Assoziation der unterschiedlichen Sensordaten möglich ist.

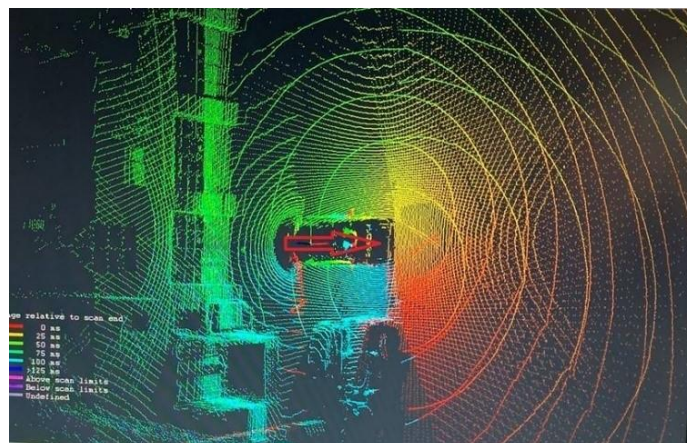


Abbildung 28: Zeitliche Synchronisierung der verbauten Lidarsensoren. Farbcodiert ist die Zeitdifferenz.

Anbindung von Götting an die Sensordaten

Für die Entwicklung der Funktion „Hinderniserkennung zur Kollisionsvermeidung“, für welche der Partner Götting zuständig war, wurden auf Basis des Sensorsetups Simulationen von MAN durchgeführt und von Götting analysiert sowie zur Funktionsentwicklung genutzt. Die nachfolgende Abbildung 29 zeigt die Visualisierung der Punktwolke, die sich aus der Simulation der im Sensorsetup vorgesehenen Lidare ergibt, samt einem Hindernis.

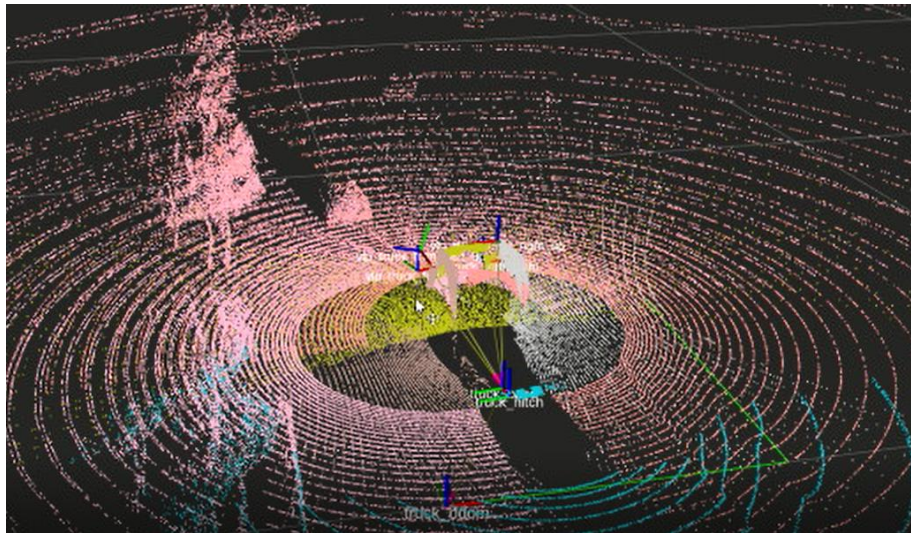


Abbildung 29: Visualisierung der Punktwolke.

Abbildung 30 zeigt Visualisierungen einer Simulation des rückwärts gerichteten Anfahrs an einen Trailer. Dargestellt sind die simulierten Punktwolken von Lidar-Sensoren, links mit eingeblendeter Geländeumgebung, rechts ohne.

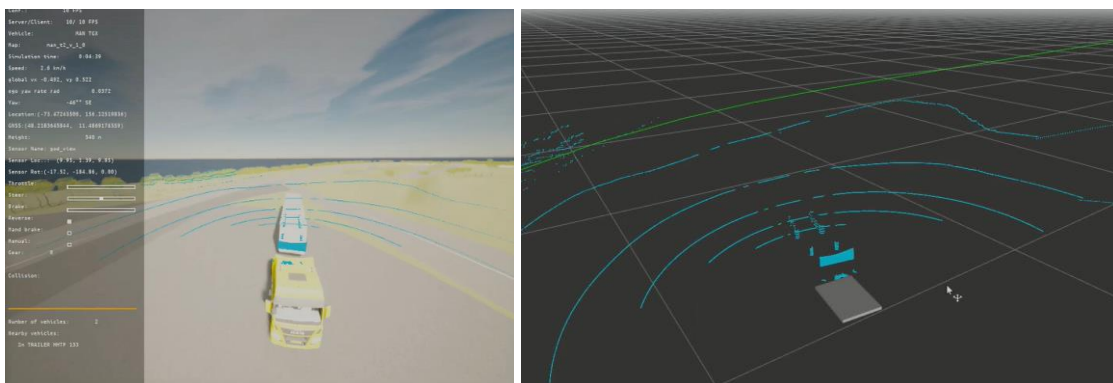


Abbildung 30: Links: Simulierte Punktwolken von Lidar-Sensoren mit eingeblendeter physischer Umgebung. Rechts: Ohne eingeblendeter physischer Umgebung.

Die Generierung der Simulationsdaten erfolgte in mehreren Schleifen und in Abstimmung mit Götting. Dazu wurden diese Module von ihrer ursprünglichen, dedizierten Hardware auf einen MAN Rechner umgezogen. Neben den Werten des Odometrieschätzers, des Knickwinkelschätzers und des Lenkwinkelsensors erhalten diese Module nun die Daten aller

Da die Halle zeitgleich mit der Photogrammetrie-Methode vermessen wurde, konnte eine eigene Software die beiden Datenmengen analysieren und zu einem gemeinsamen Überlapp bringen. Über eine Optimierung ergaben sich daraus schließlich die intrinsischen und extrinsischen Kalibrierparameter aller Lidar- und Kamerasensoren. Damit wurde die Lidar- und Kamerakalibrierung abgeschlossen.

Abbildung 32 zeigt einen Vergleich zwischen einem unkalibrierten und einem kalibrierten Lidar-System am Versuchsträger. In beiden Fällen ist die Szene identisch.

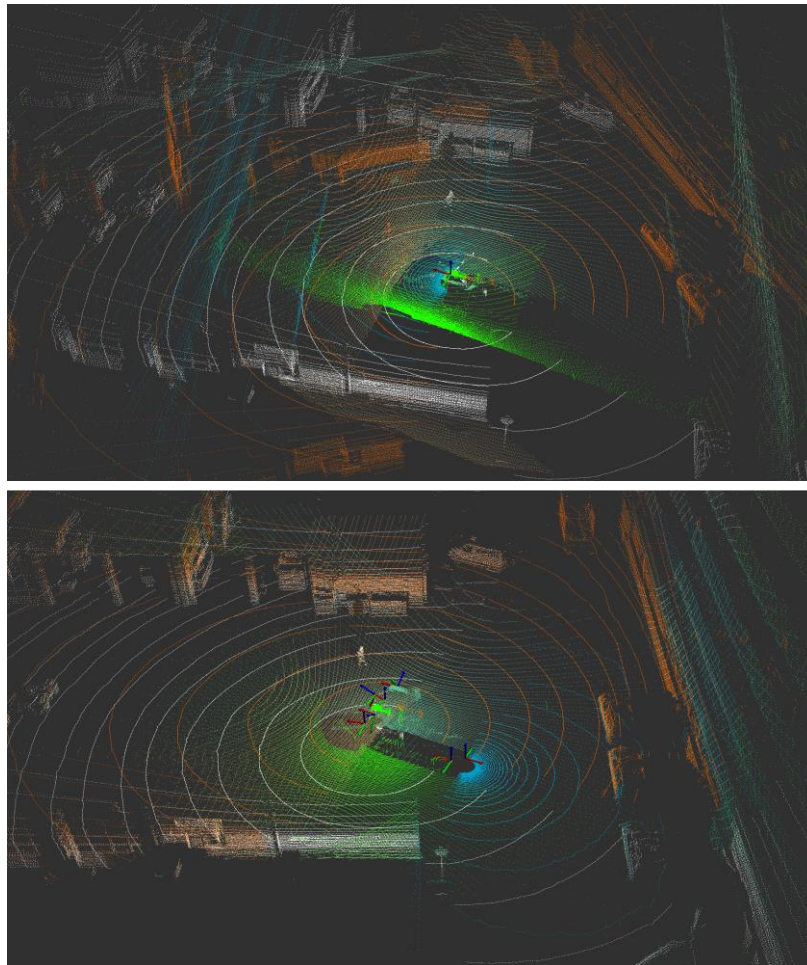


Abbildung 32: Oben: Unkalibriertes Lidar-System am Versuchsträger. Unten: Kalibriertes Lidar-System.

Radarodometrie und -onlinekalibrierung

Die derzeit entwickelten Kalibriermethoden sind für Kamera- und Lidarkalibrierung sehr erfolgreich, sind allerdings nur eingeschränkt geeignet, um Radare zu kalibrieren. Hierfür wurde ein eigenes Verfahren entwickelt. Aus den gemessenen Dopplergeschwindigkeiten der statischen Umgebung um den LKW wird die Ego-bewegung des LKW geschätzt. Das Ergebnis ist eine Odometrie, welche von nachfolgenden Modulen verwendet werden kann. Weiterhin gehen in diese Berechnungen auch die Kalibrierparameter der Radare ein. Anstatt eine Odometrie zu berechnen, kann daher das Modul auch zur Onlinekalibrierung der Radare eingesetzt werden, wenn eine alternative Odometriequelle im Fahrzeug zur Verfügung steht.

Im Projekt ANITA konnten die Posen der Radare am Fahrzeug, bestehend aus x- und y-Achse der bodenparallelen Ebene sowie dem Gierwinkel, live geschätzt werden.

Lokalisierung

HAD-Karte

Für die Lokalisierung, d. h. die Eigenortung des automatisierten LKW, wurde eine Highly-Automated-Driving-(HAD-)Karte benötigt. Mit der für die Erstellung einer solchen Karte notwendigen Vermessung wurde ein Dienstleister beauftragt. Nachfolgende Abbildung 33 zeigt das Messfahrzeug im DBIS-Depot in Ulm und auf der MAN-Teststrecke in München.



Abbildung 33: Links: Messfahrzeug im DBIS-Depot Ulm. Rechts: MAN-Teststrecke in München.

Im nächsten Schritt wurden die Messdaten evaluiert und die HAD-Karten erstellt. Nachfolgende Abbildung 34 zeigt einen Arbeitsstand der Karte des DBIS-Depots, welcher über ein Satellitenbild gelegt wurde.



Abbildung 34: Karte des DBIS-Depots.

Graphenbasierte Lokalisierung

Im ANITA Projekt wurde eine graphenbasierte Lokalisierung eingesetzt. Diese fusionierten Positionen des globalen Navigationssystems (Global Navigation Satellite System – GNSS), Odometrie und in der Umgebung detektierte Landmarken mittels eines Faktorgraphens. Das Ergebnis ist einerseits eine sehr genaue, kartenrelative Pose des Fahrzeugs, welche für die Planung benötigt wird. Andererseits werden auch alle Landmarken geschätzt, was eine konstante Erneuerung der benutzten Karte ermöglicht (siehe Abbildung 35).

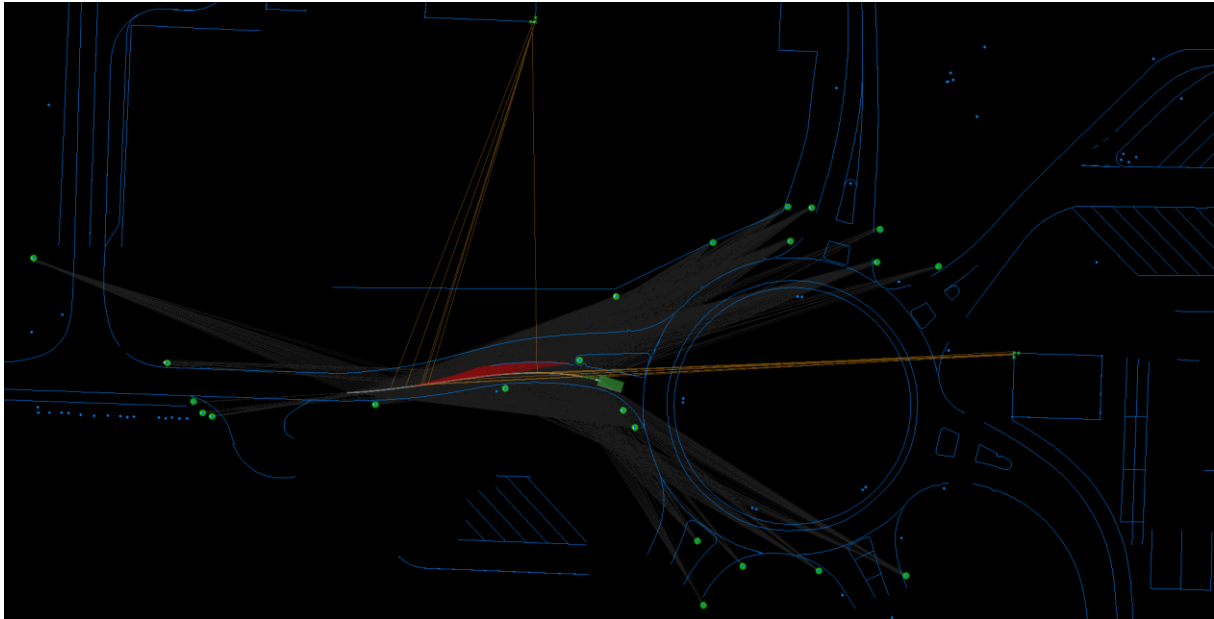


Abbildung 35: Graphenbasierte Lokalisierung. Karte (blau); zur Karte zugeordnete Landmarken (grün); Landmarkenmessungen (grau, orange und rot).

Sensordatenverarbeitung und Fusion

Datenfusion

Ein wesentlicher Bestandteil von ANITA in der Umfeldwahrnehmung ist die Nutzung einer Low-Level-Fusion. Bei einer Low-Level-Fusion werden die Sensordaten mehrerer Sensoren frühzeitig in der Verarbeitungskette in einem gemeinsamen Datenraum überlagert (superpositioniert). Die superpositionierten Sensordaten wirken damit wie von einem einzigen Sensor aufgenommen, daher wird hier auch der Name Super-Positions-Sensor (SPS) verwendet. Im Projektzeitraum wurde zunächst eine erste Inbetriebnahme eines Low-Level-Fusionsansatzes erreicht. So konnten Kamera- und Lidar-Daten aus Messfahrten nachträglich mit einer Low-Level-Fusion verknüpft und zu einem Gesamtbild fusioniert werden. Die Abbildung 36 zeigt links das Bild einer am Versuchsträger verbauten Kamera und rechts die Punktwolke der Lidare mit überlagerter Farbinformation aus dem Kamerabild.

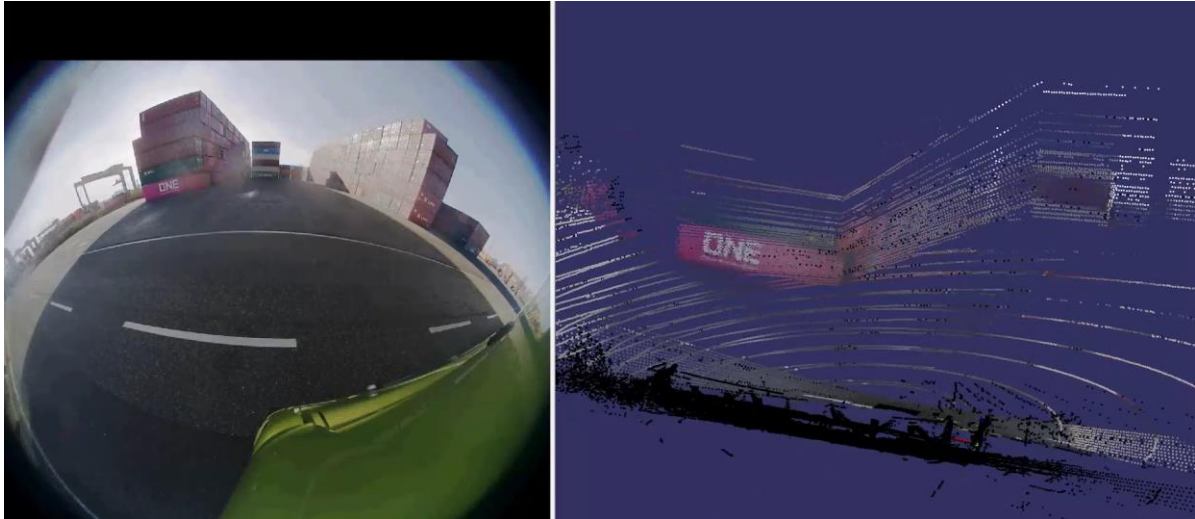


Abbildung 36: Links: Bild einer am Versuchsträger verbauten Kamera. Rechts: Punktwolke der Lidare.

Zum Thema Low-Level-Fusion lief zudem ein Forschungsauftrag während des Projektzeitraums, in dessen Rahmen die Integration der Sensormodalität Radar in die Low-Level-Fusion entwickelt wurde.

SPS und Objektdetektion

Die SPS-Fusion findet separat pro Sensor-Cluster statt. Die Lidarpunktwolke ist das Trägermedium und wird mit Klasseninformation aus den semantisch segmentierten Kamerabildern und den Geschwindigkeitsinformationen der Radare angereichert. Die einzelnen SPS-Punktwolken im jeweiligen Sensorkoordinatensystem werden nun fusioniert und in das Koordinatensystem eines "virtuellen" Sensors transformiert. Diese Daten werden für die Lokalisierung und die Objektdetektion verwendet (siehe Abbildung 37).

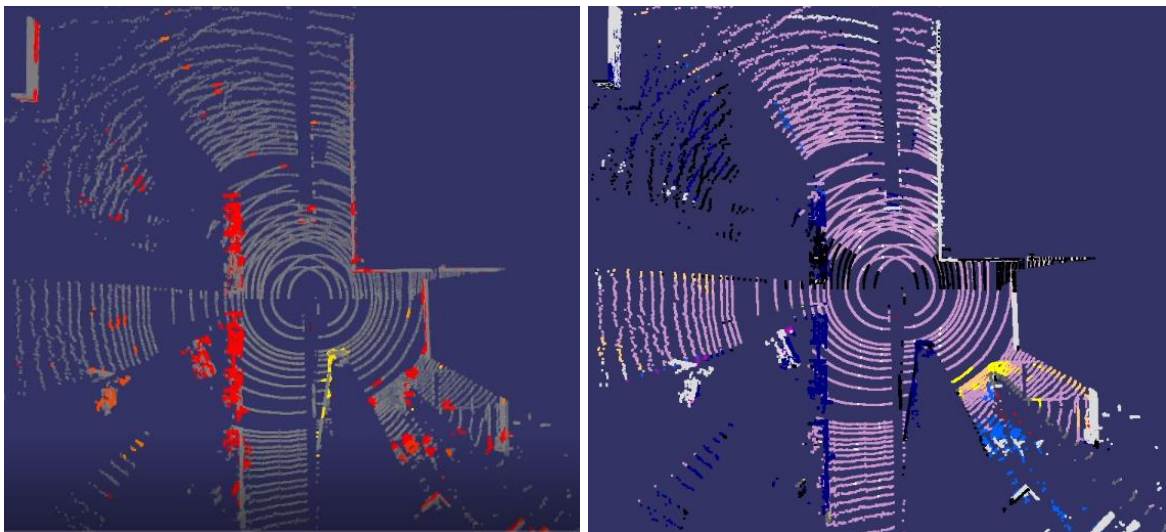


Abbildung 37: Visualisierung der fusionierten SPS-Punktwolke. Links: farbkodierte Geschwindigkeit. Rechts: semantische Segmentierung.

Objektdetektion

Die Daten der Low-Level-Fusion werden sowohl für die Erkennung und das Tracking dynamischer Objekte als auch für das statische Belegungsgrid genutzt. Das Belegungsgrid ist eine kartesische Darstellung eines Raumes, in dem die Besetzung bestimmter Objekte und Hindernisse angezeigt wird. In ANITA wurden die Daten der Low-Level-Fusion sowohl für die Erkennung und das Tracking dynamischer Objekte als auch für das statische Belegungsgrid genutzt. Dies bedeutet, dass die Fusion von Daten aus verschiedenen Sensoren und Quellen verwendet wurde, um sowohl bewegliche Objekte zu erkennen und zu verfolgen als auch eine statische Darstellung der Umgebung zu erstellen, die anzeigt, welche Bereiche des Raumes belegt sind und welche frei sind.

Diese Technik wurde erfolgreich im Fahrzeug implementiert und in Betrieb genommen. Das bedeutet, dass das Fahrzeug in der Lage ist, basierend auf diesen Daten seine Umgebung zu interpretieren und angemessen darauf zu reagieren. Zusammen mit dem Bewegungsplaner, wurden diese Daten und das Belegungsgrid im Terminal erprobt und optimiert, um sicherzustellen, dass das Fahrzeug effizient und sicher agieren kann.

Erprobungsphase

Die Erprobungsphase war ein wichtiger Schritt, um die Funktionalität und Zuverlässigkeit der Umfeldwahrnehmung zu verbessern. Im Ergebnis wurden sowohl die eigenen Softwaremodule als auch die Schnittstellen zu nachfolgenden Softwaremodulen optimiert und angepasst.

Grundsätzlich wurde die Umfeldwahrnehmung, mittels Visualisierung, sowohl live im Fahrzeug als auch mit aufgezeichneten („geloggten“) Daten analysiert. Mit diesen war es auch möglich, den Quellcode für eine vertiefende Fehlersuche mit den Originaldaten zu reproduzieren. So wurde beispielsweise an der verbesserten Detektion leerer Chassis gearbeitet, die auf Grund ihrer geometrischen Beschaffenheit nur wenige Lidar-Reflektionen in der Punktwolke hervorriefen. Auch das Nachtraining der neuronalen Netze für die semantische Segmentierung wurde auf Basis der Befunde aus den Erprobungsfahrten durchgeführt (siehe Abbildung 38). Querende und entgegenkommende Fahrzeuge konnten damit in der Depot-Umgebung zuverlässig erkannt werden.

Mit der gemeinsamen Erprobung der an die Umfeldwahrnehmung angeschlossenen Bewegungsplanung wurden weitere Anpassungsbedarfe an den Parametern beider Komponenten aufgedeckt. Die Abstimmung der Umfeldwahrnehmung auf die Bewegungsplanung beinhaltete beispielsweise die Anpassung der Schwellwerte, ab welchen Topografieänderungen von der Umfelderkennung weitergeleitet wurden.



Abbildung 38: Links: Semantische Segmentierung des ursprünglichen Netzes. Rechts: Output nach dem Training.

3.3.2 Bewegungsplaner (AP 2.3.2)

Gegenstand dieses Arbeitspakets war die Entwicklung eines Funktionsmoduls zur Bewegungsplanung, welches, ausgehend von einer Beschreibung der Umgebung, des eigenen Bewegungszustands und einer angeforderten Fahraufgabe, eine Solltrajektorie für das automatisierte Fahrzeug generiert. Im Rahmen des Projekts ANITA wurden dabei insbesondere folgende drei Entwicklungspakete bearbeitet und abgeschlossen:

- Umgang mit hochdynamischen Umgebungsbedingungen in einem Depot oder Terminal, insbesondere prädiktive Berücksichtigung von erkannten Verkehrsteilnehmern oder Hindernissen.
- Entwicklung und Integration einer Kommunikationsschnittstelle für Logistiksysteme, um einen reibungslosen Informationsaustausch zwischen verschiedenen Komponenten zu ermöglichen.
- Reaktion auf Änderungen der Vorgaben durch die Terminalsteuerung.

Für detaillierte Informationen wird an dieser Stelle auf den partnerspezifischen Bericht von MAN verwiesen.

Insgesamt konnte durch die Abstimmung und Optimierung der Prädiktionserstellung und entsprechender Verarbeitung im Bewegungsplaner ein gutes Verhalten des autonomen Trucks im Terminalverkehr erreicht werden. Gleichzeitig offenbarte sich allerdings, dass die teils sehr speziellen Bedingungen der Infrastruktur und verbundener Abläufe in einem Containerterminal aus Automatisierungssicht herausfordernd und teils nur mit aufwändigen Entwicklungsschleifen im Fahrzeug umzusetzen sind.

Aus Sicht der Bewegungsplanung war die Zerlegung der Gesamtmission in Teilmanöver ein wichtiger Aspekt und wurde durch das systematische Fahren von Missionen ebenfalls repräsentativ getestet. Das Parken des Sattelzugs auf über die Kommunikationsschnittstelle zugewiesenen Parkplätzen erforderte, bedingt durch die Straßenführung, die Vorgabe sogenannter Anfahrtsrouten. Diese machten es möglich, flexibel auf die zugewiesene

Parkposition fahren zu können, ohne gleichzeitig das im Normalfall geltende Rechtsfahrgebot aufzuheben. Durch dieses Vorgehen wurde auch die notwendige Intelligenz im Bewegungsplaner im Falle einer belegten Parkposition vermindert und so die Generalisierbarkeit des Bewegungsplaners auf den Einsatz auf öffentlichen Straßen und Containerterminals beibehalten.

Automatisiertes Auf- und Absatteln

In AP 2.3.2 wurden außerdem Arbeiten zum automatischen Aufsatteln durchgeführt, um die Funktionalität erfolgreich in Betrieb zu nehmen. Die Applikation stellte hohe Anforderungen an die zu erreichende Genauigkeit über alle beteiligten Module hinweg, um die räumlichen Begrenzungen einzuhalten und Fahrzeug und Trailer während des Aufsattelvorgangs nicht zu beschädigen. Dazu wurden in enger Kollaboration mit dem Projektpartner Götting Verbesserungen der Trailer-Lokalisierung erwirkt, Fehlfunktionen analysiert und behoben. Ebenso wurde in enger Abstimmung mit den beteiligten Teams die Fahrbarkeit der generierten Bewegungspläne verbessert, um eine ausreichend hohe Regelgenauigkeit erreichen zu können. Der für den Ablauf des Aufsattelvorgangs benötigte Task Manager wurde ebenfalls überarbeitet und noch vorhandene Fehlfunktionen analysiert und beseitigt. Durch die erfolgten Abstimmungen aller beteiligten Module aufeinander, durch die Erhöhung der Genauigkeit, sowohl der Eingangssignale aus Trailer- und Fahrzeuglokalisierung als auch durch die Verbesserung der Fahrbarkeit generierter Trajektorien und mögliche Regelgenauigkeit, konnte schlussendlich erfolgreich und reproduzierbar automatisch aufgesattelt werden.

3.3.3 Motion Control (AP 2.3.3)

Gegenstand dieses Arbeitspakets war die Konzeption und Entwicklung aller fahrzeugnahen Funktionen des in ANITA implementierten Automatisierungssystems. Der funktionale Umfang des Arbeitspakets umfasste zunächst eine Trajektorienfolgeregelung (Trajectory Tracking Control – TC), die geeignete „abstrakte“ Regelbefehle (z. B. Sollbeschleunigung, Sollgierrate) an das Fahrzeug übermittelt, so dass dieses der durch die Bewegungsplanung vorgegebenen Referenztrajektorie möglichst präzise folgt. Eine Eigenzustandsschätzung (Self Awareness) stellt möglichst genaue, driftstabile Schätzwerte für Eigenzustandsgrößen (etwa Beschleunigungen, Drehraten, Geschwindigkeiten und Euler-Winkel) bereit, welche der Regelung, Bewegungsplanung und Selbstlokalisierung als Eingangsgrößen dienen.

Eine der Trajektorienfolgeregelung nachgelagerte Regelschleife (Vehicle Control) zur Umsetzung der Stellbefehle der Trajektorienfolgeregelung setzte diese abstrakten Befehle in Stellbefehle an die Fahrzeugaktuatorik (etwa Antrieb, Bremse, Lenkung) um und stellte darüber hinaus Schnittstellen zu Licht- und Chassisfunktionen, wie der Luftfederung, bereit, welche für die Absolvierung der Mission angesteuert werden mussten. Diese Stellbefehle mussten aus Sicht der Funktionalen Sicherheit zu jeder Zeit durch einen an Bord befindlichen

Sicherheitsfahrer übersteuerbar sein und durften zudem nur umgesetzt werden, wenn das System fehlerfrei, auf expliziten Wunsch des Sicherheitsfahrers aktiv ist und sich innerhalb seiner Systemgrenzen befindet. Letzteres wurde durch ein Betriebsmodusmanagement (Mode Management) in Verbindung mit einer Selbst- und Systemgrenzenüberwachung sichergestellt.

Das Funktionale Sicherheitskonzept zur Implementierung der letztgenannten Mechanismen wurde im Projekt ANITA ebenfalls aus diesem Arbeitspaket herausgetrieben.

Abgerundet wurden die Inhalte in diesem Arbeitspaket durch die Bereitstellung von prototypischen Aktuatoren und Steuerungen zur Realisierung einer automatischen Ver- und Entriegelung von Containern (Auto-Twistlocks – ATL) sowie zur Darstellung einer automatischen Auf- und Absattelfunktion unter Verwendung einer teilautomatisierten Sattelpkupplung (Auto-Fifth-Wheel – AFW). Nachfolgende Abbildung 39 stellt die erarbeiteten Funktionalitäten in ihrem Zusammenhang mit der Gesamtsystemarchitektur dar.

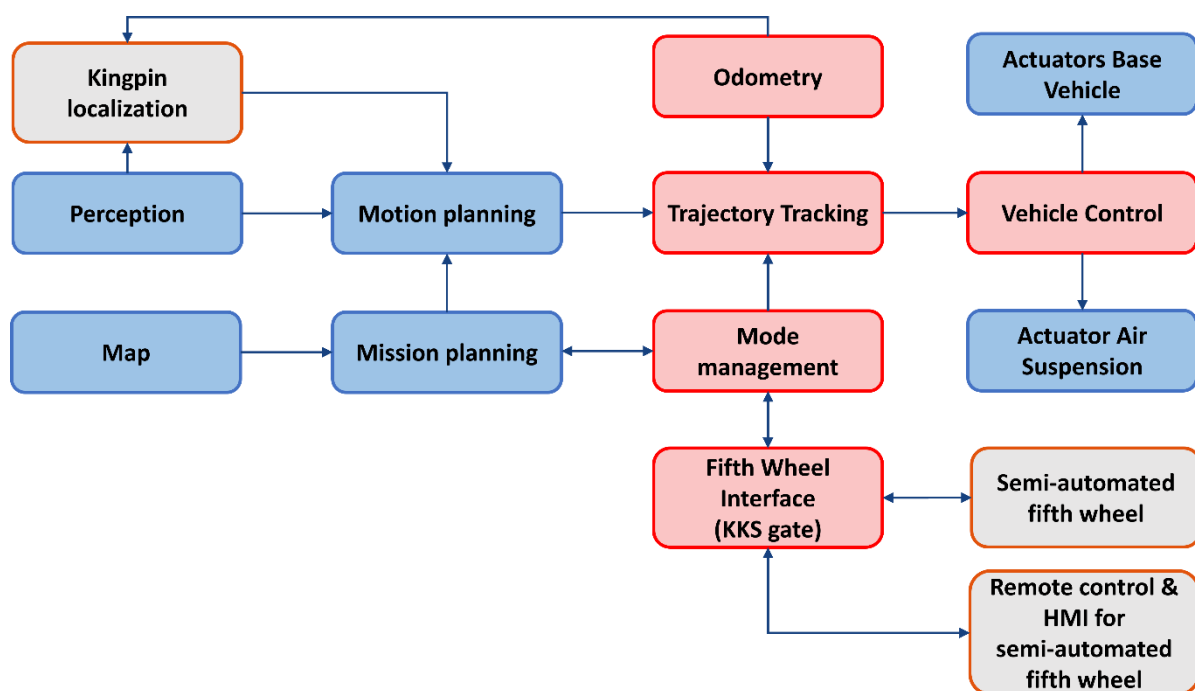


Abbildung 39: Funktionskomponenten (rot) im Gesamtsystemkontext.

Der Use-Case im Projekt ANITA stellte in Bezug auf diese Funktionalitäten in vielfacher Hinsicht eine Herausforderung dar: Zwar ist die Maximalgeschwindigkeit in den beiden Terminalteilen bei DUSS und DBIS auf 25 km/h bzw. 20 km/h limitiert, jedoch ist das Platzangebot begrenzt. Infolgedessen ist eine sehr hohe Regelgüte erforderlich. Weiterhin addierten sich hier die Fehler aus Selbstlokalisierung und Eigenbewegungsschätzung mit den Regelfehlern der Trajektorienfolgeregulierung, wodurch alle Komponenten höchsten Genauigkeitsanforderungen genügen mussten.

Insbesondere beim automatischen Aufsatteln eines Trailers im Rangierbetrieb, wobei das Zugfahrzeug autonom rückwärts unter den Trailer gefahren werden musste, bis der Kontakt zwischen Sattelkupplung und Königszapfen hergestellt war, wurden dadurch höchste Anforderungen an die Wiederholgenauigkeit der Regelung gestellt. Hier standen, bedingt durch die Bauweise, mechanisch nur wenige Zentimeter Versatz zwischen Soll- und Ist-Position in longitudinaler und lateraler Richtung zur Verfügung, auch der Orientierungsfehler musste in der Größenordnung unter einem halben Grad gering sein.

Weiterhin stellte das geringe Platzangebot, in Verbindung mit der Tatsache, dass auf engem Raum mit unvermittelt auftretenden Fußgängern zu rechnen ist, für die Funktionale Sicherheit eine Herausforderung dar. Es musste durch geeignete Limitierung der Aktuatorik des Fahrzeugs sichergestellt werden, dass bei unmittelbar fehlerbedingt auftretenden Stellbefehlen innerhalb der Reaktionszeit des Fahrers genügend Abstand zu umgebenden Verkehrsteilnehmern und Objekten verbleibt. Auch die Funktionen zum automatisierten Auf- und Absatteln sowie zur Ver- und Entriegelung von Containern, konnten aufgrund des Schadenspotenzials (potenziell tödliche Folgen für umliegende Verkehrsteilnehmer) bei Fehlfunktionen nur in Verbindung mit geeigneten, hochzuverlässigen Absicherungsmechanismen betrieben werden.

Auch Gegebenheiten und Regelungen vor Ort stellten eine Quelle von Anforderungen dar, die zu erhöhtem Absicherungsbedarf auf Seiten des Automatisierungssystems führten. So musste jegliches in der Kabine befindliches Personal während Kranungsvorgängen aus Sicherheitsgründen die Kabine verlassen, was zur Notwendigkeit entsprechender Zusatzmaßnahmen zur Absicherung gegen ungewolltes Losfahren des Fahrzeugs ohne in der Kabine befindlichen Sicherheitsfahrer führte.

Zur Detaillierung der Arbeiten zum Funktional Sicherheitskonzept, Vehicle Control und Mode Management, Trajektorienfolgeregelung und Self Awareness wird auf den partnerspezifischen Bericht von MAN verwiesen.

Automatisches Auf- und Absatteln und automatische Sattelkupplung

Das im Projekt ANITA implementierte AFW-System bestand im Wesentlichen aus einer kommerziell erhältlichen halbautomatischen Sattelkupplung, welche zusätzlich zu der im Lieferumfang enthaltenen Fernbedienung für eine Bedienung durch den Fahrer um eine Sicherheitssteuerung erweitert wurde. Diese implementierte eine zusätzliche Schnittstelle zur Ansteuerung der Aktuatoren durch das Automatisierungssystem. Das System verfügte über zwei Aktuatoren: eine Aktuierung der Verriegelung der Sattelkupplung sowie einen Aktor zum Heben und Senken der Stützen des Aufliegers.

Alle relevanten Systemteile wurden im Kontext von ANITA neu entwickelt. Dies umfasste aus Sicht des AFW-Systems die Bereitstellung der Sicherheitssteuerung im Rahmen eines Gewerks und die Bereitstellung einer Schnittstelle für die Niveauregulierung der Hinterachsluftfederung als Erweiterung der Fahrzeugschnittstelle.

Abbildung 40 stellt schematisch die Schritte zur Durchführung eines Ankoppel- bzw. Aufsattelvorgangs dar. Aus Sicht von Perzeption, Missions- und Bewegungsplanung und Fahrdynamikregelung bestand im Projekt ANITA die Aufgabe darin, jeden der abgebildeten Schritte zu automatisieren.

Dazu wurde eine mit der Missionsplanung, der Königszapfen-Lokalisierung sowie dem Onboard-Sicherheitsfahrer interagierende Ablaufsteuerung entwickelt, welche die in Abbildung 40 genannten Teilschritte des Ankoppelns – und in analoger Weise die des Abkoppelns – in Form eines Zustandsautomaten abbildete und innerhalb jedes Vorgangs die erforderlichen Unterroutrinen von Missionsplanung, Regelung, Steuerung der Sattelkupplung aufruft.

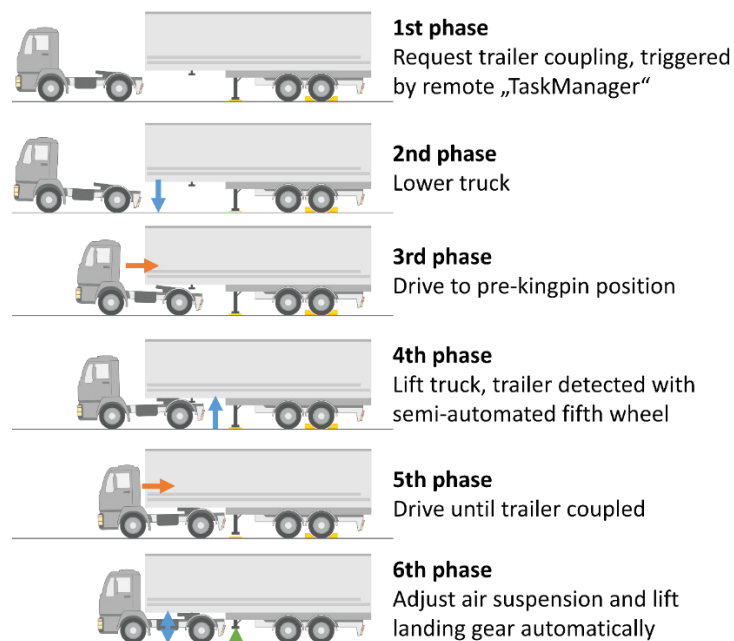


Abbildung 40: Phasen des Vorgangs zum automatisierten Auf- und Absatteln.

Automatische Twistlocks

Das ANITA-Projekt setzte sich zum Ziel, die Abläufe im kombinierten Verkehr am Beispiel eines Umschlagterminals Schiene-Straße zu automatisieren. Dabei erfolgte der Frachtumschlag durch das Verladen von Wechselbehältern bzw. ISO-Containern. Diese werden im konventionellen Betrieb durch per Hand betätigte Verriegelungselemente an den Ecken des Anhänger-Chassis ge- bzw. entsichert. In ANITA wurde mit ATL eine Funktion eingeführt, die den Vorgang automatisierte. Der verwendete Auflieger wurde zu diesem Zweck mit einer pneumatischen Aktuierung der Twistlocks ausgerüstet. Die Stellung jedes Verriegelungselements wurde mit High-integrity Sensoren erfasst. Das System wurde mit der Fertigerbremse des Aufliegers so verschaltet, dass bei Öffnung mindestens eines der Twistlocks der Anhänger gebremst wird.

Die anhängerseitige Teilfunktion des ATL-Systems, mit einem durch CAN mit dem Automatisierungssystem verbundenen ATL-Controller im Zusammenspiel mit Trailer-Bremse, Twistlocks-Aktuator und Stellungssensoren, konnte im Wesentlichen aus einem Vorgängerprojekt übernommen werden. Die ATL-bezogenen Arbeitsumfänge im Projekt ANITA bestanden, neben der Funktionalen Sicherheitsbetrachtung, vor allem in einer grundlegenden Überarbeitung der ADS-seitigen Steuerung der ATL, basierend auf Steuerbefehlen des Missionsplanungsmoduls „Task Manager“, sowie in der Anbindung an ein für die Interaktion mit Kran- und Reachstacker-Bedienpersonal ausgerichtetes HMI.

3.3.4 Mensch-Maschine-Schnittstelle (AP 2.3.4)

Anforderungserhebung

Zu Beginn des Projekts wurde in enger Abstimmung mit dem Projektteam festgelegt, welche Hardware- und Rechnerkomponenten in der Fahrzeugarchitektur für die Umsetzung des externen HMI-Konzepts vorgehalten werden müssen. Das Ergebnis war, dass im Rahmen der Rechenhardware ein eigener HMI-Rechner mit Grafikkarte sowie geeignete Schnittstellen zur Ansteuerung von Leucht- und Anzeigeelementen vorgesehen wurden.

Weiterhin wurde mit der Entwicklung des HMI-Konzepts gestartet. Unter Zuhilfenahme der Erkenntnisse aus der vorangegangenen Analyse (siehe hierzu auch den partnerspezifischen Bericht von MAN), sowie bereits durchgeführter Projekte und Studien, wurden relevante und mögliche Use Cases zu automatisiert fahrenden LKW in einer tabellarischen Matrix aufgestellt und je nach Situation, Empfänger der Information sowie der zu vermittelnden Inhalte gegliedert. Zusätzlich zu der Aufstellung in einer Matrix wurde ein Guideline-Katalog erstellt, der die Ergebnisse von Forschungs- und Industrieprojekten verschiedener Märkte und Branchen mit Bezug auf die externe Mensch-Maschine-Kommunikation zusammenfasste. In dessen Betrachtungsrahmen fielen beispielsweise Flurförderfahrzeuge in automatisierten Hochregallagern oder Konzeptstudien aus dem PKW-Bereich. Die gelisteten Guidelines dienten als Rahmenbedingungen für die weitere Planung und Entwicklung des externen HMI-Konzepts.

Unter Berücksichtigung der Inhalte des Guideline-Katalogs wurden anschließend die aufgestellten Use Cases nach Relevanz bewertet und identifiziert, ob und welche Informationen in welcher Art und Weise dargestellt werden sollen. Die Bewertung erfolgte in Abstimmung mit mehreren Experten aus interdisziplinären Bereichen, wie HMI und Funktionsentwicklung Automation. Für die relevanten Use Cases wurden Möglichkeiten der Anzeige identifiziert, die mit geeigneten Hardwarekomponenten dargestellt werden sollen. Parallel dazu wurde eine Recherche zu bereits am Markt verfügbaren Zukaufteilen und Hardwareelementen angestellt. Für die Hardwarekomponenten wurden, unter Beachtung gesetzlicher Vorgaben sowie der darzustellenden Use Cases, Anforderungen abgeleitet.

Anhand des definierten Guideline-Katalogs und der identifizierten Use Cases wurde das daraufhin entwickelte HMI-Grobkonzept iterativ weiterentwickelt. Im Iterationsprozess wurden Bereiche für die Positionierung der Leuchtelemente sowie die Funktionszustände mit visueller Rückmeldung je Use Case definiert.



Abbildung 41: Links: Bereiche zur Positionierung der Leuchtelemente. Rechts: Aufbau des externen HMI-Konzepts.

Für die ferne Umfeldkommunikation sollten an Front und Seite in unterschiedlichen Sichthöhen lichtstarke Leuchtelemente angebracht werden, damit diese sowohl von Fußgängern als auch von PKW-, LKW- oder sonstige Fahrzeugfahrern auch von weiter weg wahrgenommen werden können. Auf dem Dach sollen Leuchtelemente angebracht werden, welche direkt nach oben strahlen, um Kranfahrern rückzumelden, ob das Fahrzeug abladebereit ist. Dies ist in Abbildung 41 dargestellt. Wenn das Fahrzeug autonom fährt, sollen die Leuchtelemente in der Farbe Cyan leuchten. Wenn das Fahrzeug abladebereit ist, wechselt die Farbe auf grün. Dies ist eine Empfehlung aus SAE J 3134 (SAE International 2019).

Die MAN internen Arbeitspakete „Anforderungen an die Hardware“, „Umsetzung des externen HMI“ und „Aufbau der Hardware am Fahrzeug“ wurden im partnerspezifischen MAN-Bericht beschrieben.

Das HMI-Grobkonzept wurde iterativ weiterentwickelt und detailliert bis zum HMI-Detailkonzept. Die verschiedenen Zustände wurden in einem State-Chart definiert und festgehalten. Dies ist in Abbildung 42 schematisch dargestellt.

Das externe HMI-Konzept beinhaltet 16 Blitzleuchten, einen LED-Streifen am Türgriff, Verkabelung, Ansteuerungsmodule und Spannungsquellen. Die Punkte Kommunikation, Schnittstellen und Ansteuerung wurden in einem Tischaufbau getestet und bei Bedarf angepasst.

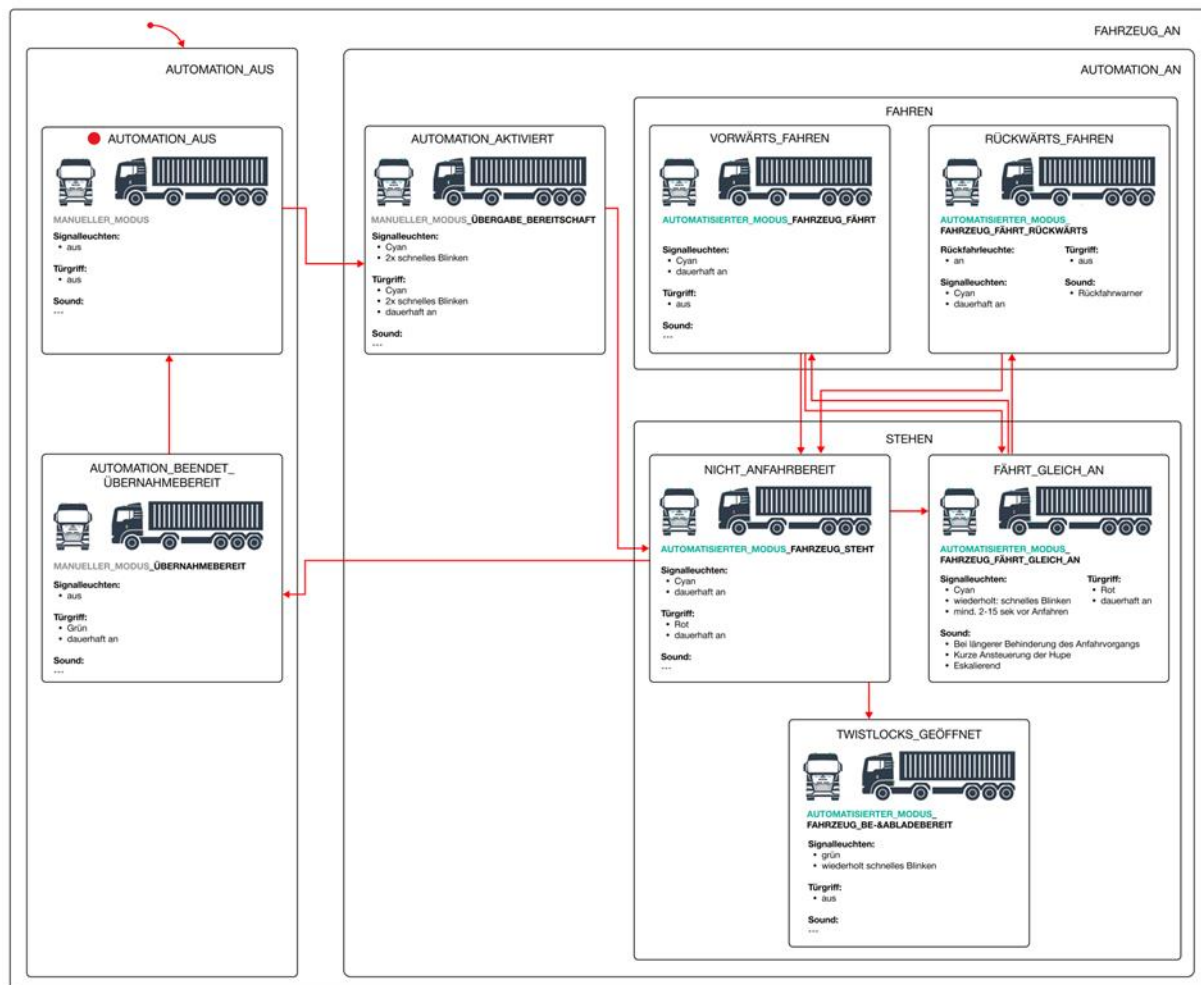


Abbildung 42: State-Chart des externen HMI-Detailkonzepts.

Anzeige für den Sicherheitsfahrer

Für den Sicherheitsfahrer wurde eine Anzeige im Clusterinstrument benötigt. Die benötigten Anzeigen wurden zwischen den Funktionsentwicklern und dem HMI-Team abgestimmt und in einem State-Chart festgehalten. Die Umsetzung wird mit Overlay-Anzeigen in das Serien-Clusterinstrument integriert. Angezeigt werden Automationsstatus, Anfahrbereitschaft, Fehler und die Notaus-Betätigung. Außerdem wird der Status der Nahhinderniserkennung dem Sicherheitsfahrer rückgemeldet. Die Signale für die Anzeigen werden über den Data Distribution Service (DDS) an den HMI-Rechner im Fahrzeug geleitet, dieser aggregiert die Zustände und sendet diese über ein Transmission Control Protocol / Internet Protocol (TCP/IP) an das Clusterinstrument.

Die wichtigste Information für den Sicherheitsfahrer ist der Automationsstatus des Fahrzeugs. Er muss wissen, ob die Automation an oder aus ist, ob das System abgebrochen bzw. vom Fahrzeug abgeworfen wurde oder ob die Automation planmäßig beendet wurde um entsprechend handeln zu können (siehe Abbildung 43). Wenn das Fahrzeug während der automatisierten Fahrt zum Stehen kommt, kann ggf. eine Anfahrbestätigung nötig sein.

Die Aufforderung dazu wird im Clusterinstrument angezeigt (siehe Abbildung 44). Während der Abfertigung sind die Twistlocks geöffnet und ein Anfahren nicht erlaubt und nicht möglich. Dies wird als Stoppwarnung angezeigt. Ein Absicherungssystem ist die Nahhinderniserkennung. Wenn ein definierter Bereich verletzt wird, erscheint eine Kollisionswarnung, die den Sicherheitsfahrer zum sofortigen Eingreifen und Handeln auffordert. Sollte der Not-Aus-Knopf gedrückt sein, ist es nicht möglich das Automationssystem zu starten. Wenn dies der Fall ist, erscheint ein Icon im Clusterinstrument als Hinweis.

Die benötigten Grafiken zur Darstellung der Informationen für den Sicherheitsfahrer wurden intern beim MAN erstellt. Die Integration in das Clusterinstrument wurde über eine externe Beauftragung umgesetzt.



Abbildung 43: Links: Anzeige „Automation an“ im Cluster. Rechts: Anzeige „Automation aus“.



Abbildung 44: Links: Hinweis zur Wiederanfahrt: „Zum Anfahren Fahrpedal betätigen“. Mitte-Links: Stoppwarnung, wenn Twistlocks geöffnet sind: „Anfahren nicht möglich“. Mitte-Rechts: Kollisionswarnung bei einer Nahhinderniserkennung. Rechts: Anzeige, wenn der Not-Aus gedrückt ist.

Allgemeine Information auf dem Testgelände

Um im Testbetrieb den anderen Verkehrsteilnehmern eindeutig mitzuteilen, dass es sich beim Testfahrzeug um kein normales, sondern ein selbstfahrendes Fahrzeug handelt, wurden Symbole für Hinweisschilder entwickelt (siehe Abbildung 45). Diese wurden am Fahrzeug, sowie im Terminal und in Schulungsunterlagen angebracht und verwendet, um

sämtliche Personen am und im Terminal von der Besonderheit des Fahrzeugs zu unterrichten und auf entsprechende Umsicht in dessen Umgebung hinzuweisen.

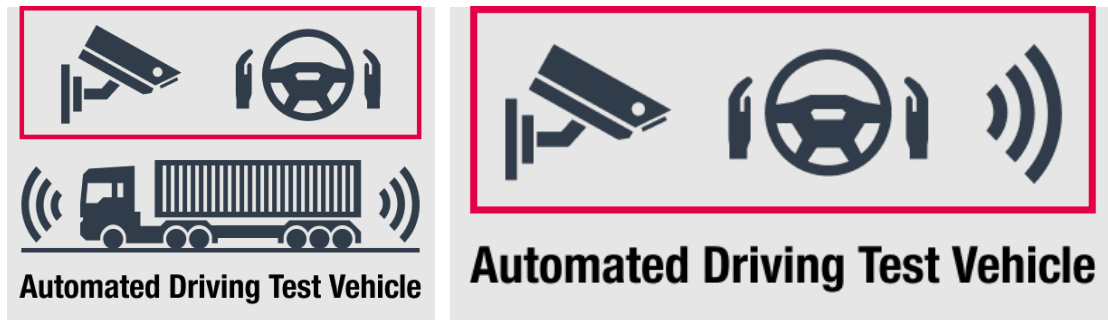


Abbildung 45: Links: Warnhinweis auf Schildern und Schulungsunterlagen. Rechts: Warnhinweis zur Anbringung am Fahrzeug.

Usability Evaluierung

Während der Pilotphase des Projekts wurde eine Usability-Evaluierung der implementierten HMI-Elemente in Ulm durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden detaillierte Szenariobeschreibungen, Interviewmaterial und Fragebögen entworfen. Ziel war die Beantwortung folgender Forschungsfragen (Research Question – RQ) und anschließender Evaluierung, welche Informationen dem Nutzer in bestimmten Situationen einen Mehrwert bieten.

- RQ1: Wann ist eine Kommunikation zwischen dem Fahrzeug und anderen Verkehrsteilnehmern erforderlich?
- RQ2: Welche Information soll in diesen Situationen kommuniziert werden?
- RQ3: Wie ist die allgemeine Wahrnehmung des LKW in diesen Situationen?

Usability Bewertung des Designkonzepts und der Umsetzung:

- RQ4: Können die verschiedenen Fahrzeugzustände klar voneinander unterschieden werden?
- RQ5: Wie soll das externe HMI designt werden, um eine gute Usability zu erzielen?
- RQ6: Stellen die Konzepte eine gute Umsetzung dar?

Die ursprüngliche Planung sah vor, Interviews in zwei Szenarien durchzuführen: das Entlade-Szenario und das Übernahme-Szenario. Da die Zeit zur Durchführung jedoch begrenzt war und auch nur begrenzt Probanden zur Verfügung standen, wurde das Übernahme-Szenario nicht in die Evaluierung aufgenommen.

Das Entlade-Szenario umfasste zwei Nachrichten, die durch das externe HMI kommuniziert wurden, „Bereit zum Entladen“ und „Automatisierte Fahrt“. Die erste Nachricht wurde aktiviert, wenn der LKW im Stillstand auf der Entladeposition stand und bereit für die Entladung war. Das wurde durch grünes, pulsierendes Licht kommuniziert. Die Leuchten

befanden sich am hinteren Ende des Fahrerhauses. Die Nachricht „automatisierte Fahrt“ wurde kurz bevor das Fahrzeug anfuhr und während der Fahrt aktiviert. Diese Nachricht wurde durch konstant leuchtendes Licht in der Farbe Cyan an der Vorderseite des Fahrerhauses dargestellt.

Insgesamt wurden acht Interviews durchgeführt, davon vier mit Kranfahrern und vier mit Staplerfahrern. Alle Interviews wurden vor Ort in den Kränen der DUSS und den Staplerfahrzeugen der DBIS durchgeführt, während diese mit dem automatisierten Fahrzeug interagierten.

Ergebnisse

Das Entlade-Szenario wurde als die Situation identifiziert, in der die Kommunikation durch das externe HMI den größten Mehrwert bietet. Die Interaktion zwischen Operator und LKW begann, als der LKW die Ladeposition erreicht hatte und zu Stillstand kam und endete, als der Operator das Entladen beendete. Die meisten Teilnehmer der Studie interagierten nicht mehr mit dem LKW, nachdem dieser wieder losgefahren war. Deshalb wurde eine zusätzliche Kommunikation durch externes HMI beim Losfahren oder während der Fahrt nicht als sinnvoll befunden.

Die Operatoren schenken der Tatsache, dass der LKW automatisiert fuhr, wenig Beachtung, sie führten die Entlade-Aufgabe genauso aus wie bei einem manuell gesteuerten LKW. Viele der Operatoren verließen sich auf die Anwesenheit des Sicherheitsfahrers.

Bereit zum Entladen: Die meisten Nutzer haben die Anzeige „Bereit zum Entladen“ richtig interpretiert und bewerteten die Information als nützlich während des Entlade-Szenarios. Insbesondere, wenn zukünftig der Sicherheitsfahrer nicht mehr im Fahrzeug anwesend ist, werden die Lichtsignale als hilfreich empfunden, um zu entscheiden, ob das Fahrzeug bereit ist, entladen zu werden.

Die Nutzer waren mit dem Konzeptdesign zufrieden und gaben an, dass es einen positiven Effekt auf ihre wahrgenommene Effizienz hätte. Die grünen Lichter wurden mit „alles ok“ oder „bereit zu starten“ verbunden. Manche Teilnehmer sahen eine Analogie zu Verkehrsampeln bei denen grün „Gehen“, rot „Stehen“ und gelb „Vorsicht“ bedeutet. Die HMI-Signale sollten aktiviert werden, wenn der LKW an der Ladeposition im Stillstand angekommen ist und bereit ist, entladen zu werden. Diese Anzeige wurde nicht als im Konflikt stehend, zu anderen Fahrzeugsignalen, bewertet.

Automatisierte Fahrt: Wenige Teilnehmer bemerkten die Lichtsignale für „Automatisierte Fahrt“, da sie dem LKW erst dann Aufmerksamkeit schenken, als dieser in der Ladeposition angekommen war. Von den Teilnehmern, die die cyan-farbenen Lichter bemerkten, interpretierten es einige korrekt als „Automatisierte Fahrt“. Andere Interpretationen waren „Fahrzeug kommt“ oder „nicht bereit zum Entladen“. Nur wenige Teilnehmer bewerteten die Information „Automatisierte Fahrt“ als relevant.

Die cyan-farbigen Lichter wurden als schwer wahrnehmbar bewertet und ein Teilnehmer merkte an, dass diese als Tagfahrlicht interpretiert werden könnten. Eine dunklere Farbe wurde vorgeschlagen, um die Sichtbarkeit und Unterscheidbarkeit von anderen Fahrzeugleuchten zu gewährleisten.

Implementierung

Die Teilnehmer der Studie waren insgesamt zufrieden mit der Umsetzung des Konzepts. Am besten bewertet wurde Farbe und Platzierung, gefolgt von Blinkfrequenz und Timing. Verbesserungspotenzial wurde bei der Positionierung der LED-Lichter, der Größe, Helligkeit und der Farbe Cyan gesehen.

3.3.5 V2X-Kommunikation (AP 2.3.5)

Als übergeordnete Logik kam der Missions- und Routenplanung eine besondere Bedeutung zu, insbesondere im Kontext der im Projekt angestrebten Integration eines autonomen Fahrzeugs in die Prozesse eines Containerterminal-Betriebs. Im Rahmen des Projekts wurde hierzu in Zusammenarbeit mit beteiligten Projektpartnern eine Kommunikationsschnittstelle spezifiziert, implementiert und getestet (siehe Abbildung 46). Diese diente dem Zusammenspiel des fahrzeuginternen Automatisierungssystems mit den terminalseitigen Logistiksystemen. In der finalen Projektphase wurden auf Basis erster erfolgreicher Systemtests, Maßnahmen zur Erhöhung der Robustheit der Interaktion gegenüber Störungen ergriffen. Im Rahmen des Pilotbetriebes wurde die Kopplung des autonomen LKW mit dem Logistiksystems durch das tägliche Abfahren mehrerer Missionen intensiv getestet und es konnten gute Ergebnisse im Sinne der Prozesseffizienz generiert werden.

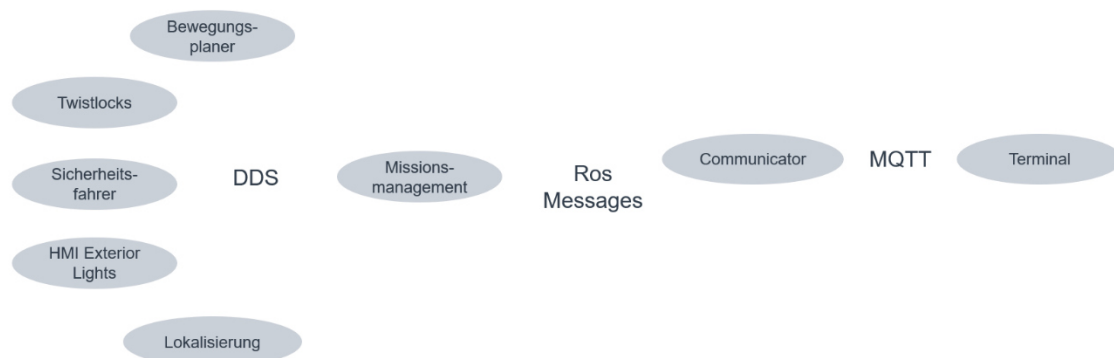


Abbildung 46: Schnittstellendesign (DDS, Message Queuing Telemetry Transport – MQTT).

Detaillierte Informationen zu der technischen Realisierung der Schnittstellen sind im partnerspezifischen Bericht von MAN zu finden.

3.4 Lokalisation von Sattelaufliegern (AP 2.4)

3.4.1 Funktionales Konzept

Auf funktionaler Ebene sieht das Konzept zur Lokalisierung des Sattelauflegers vor, Rückschlüsse über die Stützwinde des Trailers zu ziehen. Der zum Koppelvorgang anzusteuern Königszapfen misst im Durchmesser circa 5 cm und ist daher schwer auf direktem Weg zu detektieren. Bei bekannten Maßen des Trailers lässt sich von der ermittelten Position der Stützenbeine auf die Position des Königszapfens in Relation zum messenden Sensor umrechnen. Die Stützbeine sind im Querschnitt viereckig ausgestaltet, was sich in Laserscans zur Mittelpunktberechnung nutzen lässt und als Peilvorgang bezeichnet wird. Abbildung 47 visualisiert das erläuterte Prinzip.

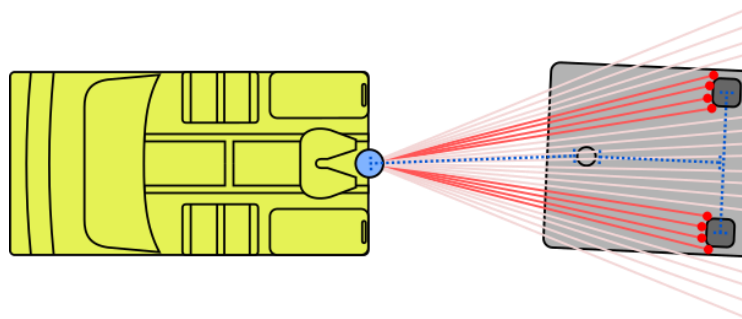


Abbildung 47: Lokalisierung über Stützbeine.

Es fand eine theoretische Betrachtung der erreichbaren Genauigkeit der Positionsbestimmung des Königszapfens statt, wenn diese über die Stützererkennung berechnet wird. Dabei wurden die Einflüsse der Winkel- und Entfernungstoleranz eines Laserscanners sowie der Einfluss dessen Positionierung relativ zur Sattelkupplung abgeschätzt. Je nach Kombination der Parameter beträgt die maximale Positionsabweichung in den untersuchten Varianten 5 cm bis 10 cm.

Mit prototypisch aufgebauten Fahrzeugen konnte gezeigt werden, dass die Stützbeine eines Sattelauflegers als Lokalisierungsmerkmal ausreichend für ein praxistaugliches Verfahren sind. Bei guten Umgebungsbedingungen betrug die maximale Positionsabweichung dabei ca. +/- 4 cm und ist damit ausreichend genau. Weiterhin wurden Daten bei verschmutzter Oberfläche des Sensors ausgewertet und zur Verbesserung der Detektionsalgorithmen genutzt. Dabei zeigt sich, dass sich die Optimierung entweder zu Gunsten der Genauigkeit oder der Robustheit des Verfahrens auswirkt.

3.4.2 Entwicklung mittels Aufzeichnungen realer Trailer-Anfahrten

Zur Annäherung an den im Projekt vorgesehenen Anwendungsfall wurde der Algorithmus mit Datenaufzeichnungen eines Entwicklungsfahrzeug der MAN getestet und weiterentwickelt.

Die Aufzeichnungen bestehen aus rückwärts gerichteten, manuell gesteuerten Anfahrten eines Sattelschleppers an einen Sattelaufleger samt Koppelvorgang. Mit einer während den Anfahrten fortlaufenden Positionsrechnung konnten die bisherigen Abschätzungen der erreichbaren Genauigkeit validiert werden. Ebenso konnten zu beachtende Umstände, wie beispielsweise die Zunahme des Messwertrauschens an bestimmten Positionen zum Trailer, erkannt werden. Abstimmungen zwischen der Götting KG und MAN zur Lokalisierungsgenauigkeit, den Anforderungen an die Sensorkalibrierung, der Sensoranbauposition und zur Messdatenkonvertierung brachten weitere Fortschritte. Weiterhin wurden die Auswirkungen von Anbauteilen, wie zum Beispiel einer Kurbel in unmittelbarer Nähe der Stützen, auf die Robustheit des Algorithmus hin analysiert. Die störenden Einflüsse der Kurbel sind in Abbildung 48 visualisiert. Der Laserscanner detektiert die Stützen wie am rechten Rand zu sehen. In der Punktwolke der unteren Stütze zeichnet sich die rechteckige Form der Stütze ab, die Auswertung der oberen Punktwolke ist dagegen durch Reflexionen der Kurbel deutlich erschwert. Es wurden mehrere Berechnungsvarianten und Detektionsparameter implementiert und verglichen.



Abbildung 48: Ausreißer aufgrund störender Anbauteile (obere Punktwolke).

3.4.3 Steigerung der Robustheit

Bei der Analyse verschiedener Datenaufzeichnungen von Trailer-Anfahrten zeigte sich, dass unpräzise Detektionen der Stützen sprunghaft verfälschte oder ausbleibende Positionsangaben zur Folge haben, die sich in schneller Folge mit korrekten Angaben abwechseln. Eine Möglichkeit, die Robustheit des Algorithmus zu steigern, ist die Nutzung von Odometrie-Daten. Im Falle zeitweise schlecht verwertbarer Messungen des Laserscanners kann die Berechnung durch die zusätzlichen Informationen der Odometrie gestützt werden. Zur Minimierung störender Einflüsse durch Anbauteile ist es möglich, zur Lokalisierung nur Messwerte in einem Höhenband zu berücksichtigen, in das keine Anbauteile hineinragen.

3.4.4 Stabilisierung des Suchbereichs mittels Odometriedaten

Die Lokalisierung basiert darauf, den viereckigen Querschnitt der beiden Beine der Stützwinde mittels des Laserscanners zu detektieren und relativ zum Fahrzeug zu lokalisieren. Da in der Umgebungsaufnahme weitere Strukturen mit viereckigem Querschnitt vorhanden sein können, beispielsweise ein Auflieger auf einem benachbarten Parkfeld, muss ein Suchbereich vorgegeben werden, in dem sich die Beine bzw. Stützen befinden. Um Fehldetektionen zu vermeiden ist es vorteilhaft, diesen Bereich möglichst klein zu halten.

Da sich der Sattelschlepper auf den Auflieger zubewegt, ändert sich die relative Position zwischen Stützen und Laserscanner allerdings fortwährend. Durch das Rauschen in den Sensordaten oder auch durch ein Schwanken des Chassis kann es dazu kommen, dass die Detektion zeitweise gestört ist. Ohne Nutzung der Odometriedaten steigt bei Ausbleiben einer Detektion die Unsicherheit, wo sich die Stützen im nächsten Zeitschritt befinden, und der Suchbereich muss vergrößert werden, wie in Abbildung 49 beispielhaft dargestellt.

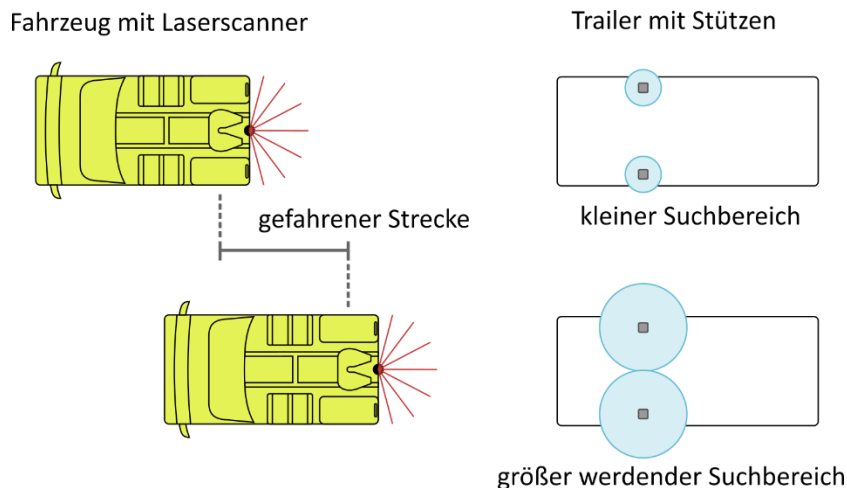


Abbildung 49: Situation bei ausgebliebener Detektion ohne Odometrienutzung.

Ist aber durch die Odometrie bekannt, wie weit sich das Fahrzeug auf den stillstehenden Auflieger zubewegt hat, kann vorausgesagt bzw. geschätzt werden, wo sich die Stützen befinden müssten und der Suchbereich kann klein gehalten werden. Dies steigert die Robustheit der Lokalisierung deutlich, denn mit diesem Verfahren ist es möglich, ein Ausbleiben der Detektion über mehrere Zeitschritte hinweg zu überbrücken. Allerdings darf dies auch nicht über einen zu langen Zeitraum hinweg geschehen, andernfalls besteht die Gefahr, dass die Stützen aufgrund Messungenauigkeiten in der Odometrie nicht mehr im geschätzten Bereich liegen. Dies kann gelöst werden, indem den Schätzungen über die Position der Stützen ein Vertrauenswert zugewiesen wird. Im Resultat muss trotz Überbrückung der Suchbereich vergrößert werden, allerdings in deutlich geringerem Umfang. Hier wurden anhand von Aufzeichnungen passende Parameter ermittelt.

3.4.5 Identifizierung eines bodenparallelen Höhenbands aus Sensordaten

Die Stützen des Sattelauflegers sind nicht in ihrer gesamten Höhe viereckig, und zahlreiche Anbauteile wie Kurbel, Füße, Anschraubplatte und Verbindungswelle schränken eine zuverlässige Detektion auf ein Höhenband mit definierter Position und Größe ein. Der Algorithmus sucht folglich nur in diesem Höhenband nach den Stützen. Die Größe des Höhenbandes begrenzt entscheidend die maximal erreichbare Detektionsreichweite, da der Laserscanner die Umgebung in diskreten Ebenen abtastet. Es kann bei einem weit entfernten Objekt dazu kommen, dass es genau zwischen zwei Scanebenen positioniert ist und kein Messpunkt des Scanners auf ihm liegt, wie in Abbildung 50 verdeutlicht.

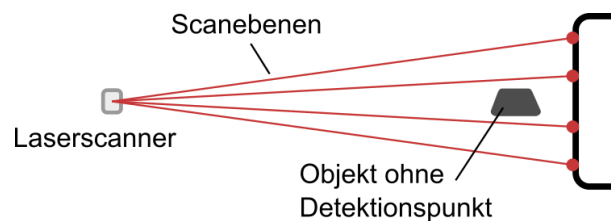


Abbildung 50: Zwischen den Scanebenen liegendes Objekt.

Beim Vorgang des Ankuppelns wird das Heck des Sattelschleppers durch eine höhenverstellbare Hinterachse stark abgesenkt. Der am Chassis angebrachte Sensor wird dadurch mit verkippt, sodass sich aus dem Bezugspunkt des Sensorkoordinatensystems die gesamte Umgebung verkippt. Dies hat zur Folge, dass die Anbauteile in ein parallel zu den Achsen des Sensors definiertes Höhenband geraten und die Detektion verhindern. In Abbildung 51 geschieht dies beispielhaft mit dem Fuß der Stützwinde.

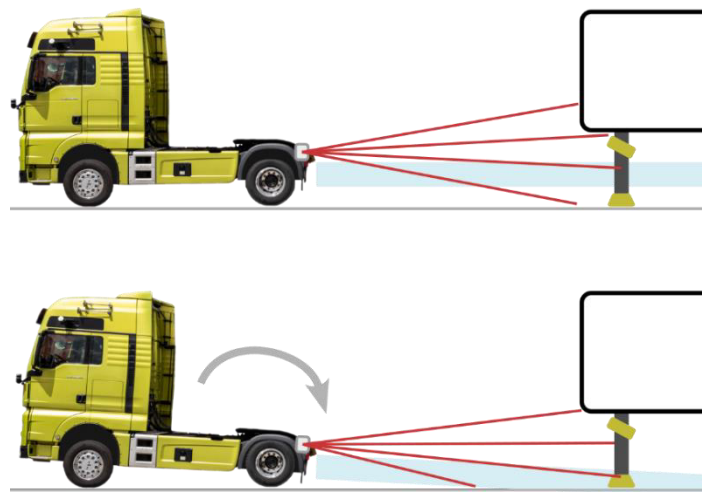


Abbildung 51: Sensorparalleles Höhenband vor und nach Neigung des Chassis.

Ein möglicher Lösungsweg ist die Verlagerung der Suche in ein bodenparalleles statt sensorparalleles Höhenband. Hierzu ist zunächst die Identifizierung des Bodens notwendig.

Aus zahlreichen, in konzentrischen Kreisen angeordneten Punkten – in Abbildung 52 links zu sehen – kann eine Ebene samt Ebenen-Normale berechnet werden. Mithilfe dieser kann mathematisch eine Koordinatentransformation des Höhenbands durchgeführt werden, sodass dies stets synchron zum Boden verkippt und somit bodenparallel bleibt.

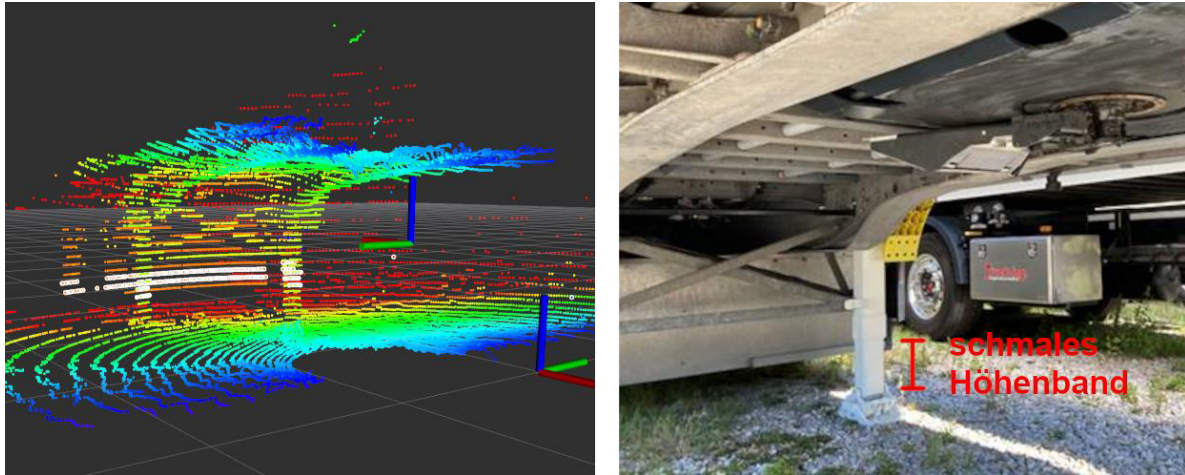


Abbildung 52: Umgebungsaufnahme des Laserscanners verglichen mit einem Foto.

3.5 Erkennung von Hindernissen (AP 2.5)

3.5.1 Funktionales Konzept

Die Hinderniserkennung aus AP 2.5 hat vorrangig das Ziel, eine mögliche Kollisionsgefahr zu signalisieren und diesbezüglich Redundanzkonzepte vorzubereiten. Dazu soll sie möglichst unabhängig von anderen Systemen des Fahrzeugs die Umgebung analysieren und die Fahrsituation bewerten. Der Nutzen dieses Konzepts besteht darin, ein zum restlichen Fahrzeug redundantes System zu erhalten, das nicht denselben möglicherweise auftretenden Fehlinterpretationen unterliegt, sowie bei Systemausfällen ein Rückfallebene bietet.

Aus diesem Grund besteht kein Zugriff auf die Bewegungsplanung des Automatisierungssystems, sodass die Fahrsituationen ausschließlich mit der Umgebungserfassung der Laserscanner als Punktwolke, der Odometrie des Fahrzeugs und dem gemessenen Winkel zum Sattelaufleger bewertet werden.

Dies stellt insofern eine Herausforderung dar, als dass das System der Hinderniserkennung selbst die Fahrzeugbewegung vorhersagen muss, um eine Aussage über mögliche Kollisionen treffen zu können. Zeitlich ist die Vorhersage stets etwas verzögert, da das System auf die Messungen der Odometrie reagieren muss. Es kann nicht vorhersehen, ob und wie lange es beispielsweise beim aktuell anliegenden Kurvenradius bleibt, oder ob die Kurve noch enger oder bereits ausgeleitet wird.

So entstehen konzeptbedingt Grenzen des Systems, beispielsweise bei Fahrwegen in Richtung einer Wand, vor der die Bewegungsplanung ein Abbiegen vorsieht; am Kurvenausgang einer engen Kehre, bei denen die Bewegungsplanung bereits ein Auslenken einplant oder Geradeausfahrt dicht an einer längeren Hallenwand entlang, bei der die Bewegungsplanung weiß, dass weiter in gerader Linie ohne Kurve entlang der Wand gefahren werden soll.

Schwierigkeiten entstehen dabei besonders an Engstellen bzw. geplanten Annäherung an Hindernisse mit zügiger Geschwindigkeit. Die Fahrgeschwindigkeit hat einen bedeutsamen Einfluss, da die Hinderniserkennung bei höheren Werten von einem längeren Bremsweg ausgeht und weiter entfernte Umgebungsaufnahmen mit einbezieht. Je nach Parametrierung kann die Warnung vor Kollisionen konservativ vorsichtig oder auf die Bewegungsplanung vertrauend liberal ausgelegt werden. Hierfür muss eine optimale Abwägung gefunden werden.

3.5.2 Aufbau der Hinderniserkennung

Abbildung 53 zeigt eine Übersicht der implementierten Funktionalität. Diese lässt sich dabei in die Teilbereiche der Hinderniserkennung samt Klassifizierung und Bewertung aufgenommenen Datenpunkte einerseits (gelb) und der Berechnung der Fahrzeugbewegung und Fahrschlauchidentifizierung andererseits (grün) unterteilen. Eingehende Informationen sind in Blau am linken Bildrand dargestellt, die ausgehende Kollisionswarnung in Rot am rechten Bildrand. Die Hinderniserkennung ist auf Informationen der Fahrschlauchidentifizierung angewiesen, sodass zwischen diesen Teilbereichen ebenfalls ein Informationsaustausch stattfindet.

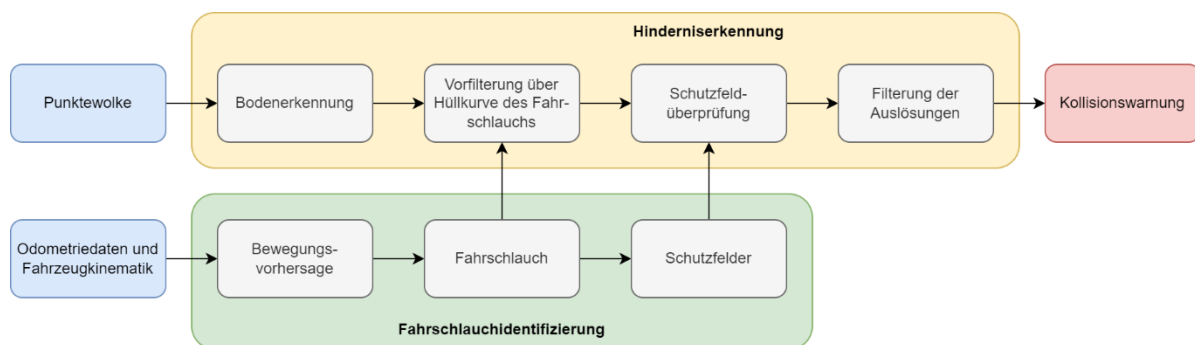


Abbildung 53: Bestandteile der Hinderniserkennung.

3.5.3 Teilbereich Fahrschlauchidentifizierung

Die Berechnung des erwarteten Fahrschlauchs kann bei Fahrten auf befestigten, weitgehend ebenen Straßen auf zweidimensionalen Charakter vereinfacht und durch die bekannte, konstant bleibende Fahrzeughöhe in die dritte Ebene überführt werden.

Grundlage sind die Fahrzeugabmessungen mit bekannter Position der Radachsen, die Odometriedaten der Fahrzeugräder und der anliegende Lenkwinkel. Aus dem Lenkwinkel, der Differenz zwischen linkem und rechtem Hinterrad, der absoluten Geschwindigkeit der Räder sowie der Fahrzeugkinematik lässt sich die erwartete Fahrzeugposition im nächsten Zeitschritt vorhersagen. Der als rechteckig angenommene Fußabdruck des Fahrzeugs wird translatorisch und rotatorisch transformiert und es kann überprüft werden, ob als mögliches Hindernis klassifizierte Punkte der Umgebungsaufnahme innerhalb des Rechtecks liegen. Um einen Fahrschlauch zu erhalten, wird die Transformation mehrmals, jeweils mit der sich ergebenden Vorhersage iterativ, erneut durchgeführt. In Abbildung 54 sind diese iterativen Vorhersagen über die Fahrzeugposition als grüne Rechtecke dargestellt. Ein sämtliches Rechteck beinhaltende Hüllkurve kann als Fahrschlauch bezeichnet werden.

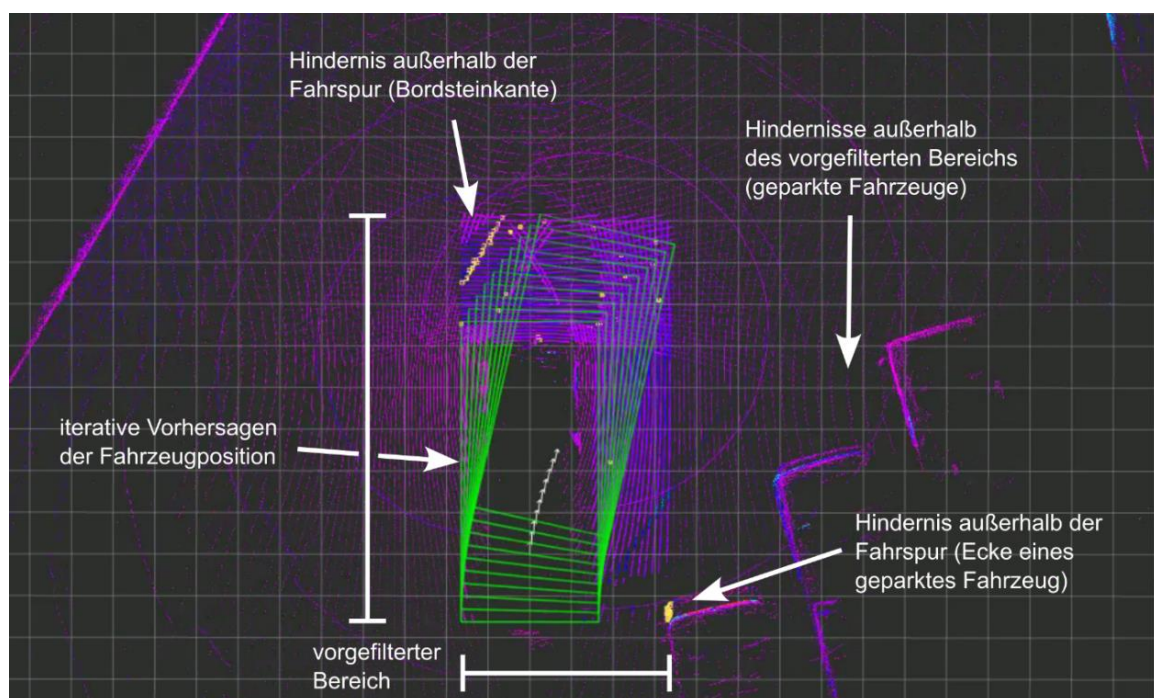


Abbildung 54: Umgebungswahrnehmung der Hinderniserkennung.

Die Berechnungen der Transformationen werden dabei zu jedem Zeitschritt mit den gemessenen Raddrehzahlen und dem Lenkwinkel erneut durchgeführt, um so einen dynamischen Fahrschlauch zu erhalten. Abbildung 55 zeigt den Vergleich zwischen einer schnellen Geradeausfahrt im linken Teil und einer anschließenden Fahrt um eine Hausecke im rechten Teil. Die Fahrzeugfront zeigt nach rechts, der zu überprüfende Bereich ist weiß eingefärbt. Die Abbildung zeigt einen Entwicklungsstand, in dem der Fahrschlauch im Kurveninneren nicht abgerundet und damit umfangreicher geprüft wird.

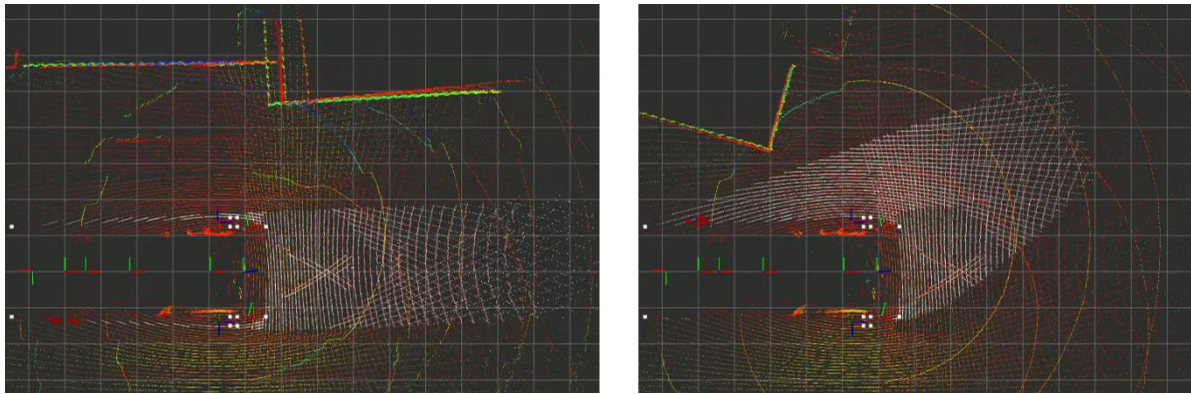


Abbildung 55: Vergleich des überprüften Bereichs zwischen schneller Geradeausfahrt und langsamer Kurvenfahrt.

3.5.4 Teilbereich Hinderniserkennung

Die Umgebungsaufnahme der Laserscanner besteht aus einer Wolke von mehreren hunderttausend dreidimensional verorteten Punkten. Es wird algorithmisch bestimmt, welche Punkte dem Fahrbahnboden zugehörig sind, also kein Hindernis darstellen. Die verwendete Berechnung stützt sich auf die Höhendifferenz zueinander benachbarter Punkte. Übersteigt der Gradient einen definierbaren Wert, werden die Punkte als möglicherweise zu einem Hindernis gehörend klassifiziert.

3.5.5 Filterung der Punktwolke

Aufgrund der Menge an Datenpunkten und nur begrenzt zur Verfügung stehender Rechenleistung werden nach der Unterteilung der Punkte in die Kategorien Fahrbahn und mögliche Hindernisse nur Punkte betrachtet, die sich innerhalb eines quaderförmigen Ausschnitts um das Fahrzeug herum befinden. In Abbildung 54 sind alle sich in diesem vorgefilterten Bereich befindenden Punkte leicht vergrößert dargestellt. Die Ausdehnung dieses Quaders steht in unmittelbarem Zusammenhang zur erwarteten, vorhergesagten Bewegung des Fahrzeugs, also dem Fahrschlauch.

In einem weiteren Schritt werden die so bereits vorgefilterten Punkte daraufhin überprüft, ob sie sich innerhalb des erwarteten Fahrschlauchs bzw. definierter Schutzfelder befinden. In Abbildung 54 sind Detektionen eines Bordsteins sowie einer Ecke eines geparkten Fahrzeuges markiert, bei denen die Prüfung negativ ausfiel. Im Falle einer positiven Prüfung werden zur Vermeidung von Fehlalarmen weitere Bedingungen geprüft. Beispielhaft ist folgender Umstand: Technisch bedingt kann es zu flackernden, zu keinem in der Realität vorhandenem Objekt gehörenden Messpunkten kommen. Eine Auslösung der Kollisionswarnung durch solche flackernden Punkte wird durch die Bedingung vermieden, dass der Fahrschlauch in mehreren, aufeinander folgenden Zeitschritten verletzt sein muss.

Bei Tests der Hinderniserkennung fielen kurzzeitig aufblitzende Objekte an Positionen auf, die nicht im Sichtbereich des betreffenden Sensors liegen. Ein an der linken Fahrzeugseite angebrachter Scanner kann nicht durch die Fahrzeugkabine hindurch Objekte rechts vom Fahrzeug erfassen. Genau dort wurde allerdings ein Objekt angezeigt. Bei der Datenanalyse stellte sich heraus, dass dies durch ein sich an der Fahrzeugseite spiegelndes Verkehrsschild hervorgerufen wurde. Ein hoher Reflexionsgrad, wie ihn Straßenschilder aufweisen, begünstigt solche Fehldetektionen. Abbildung 56 verdeutlicht die beschriebene Anomalie.

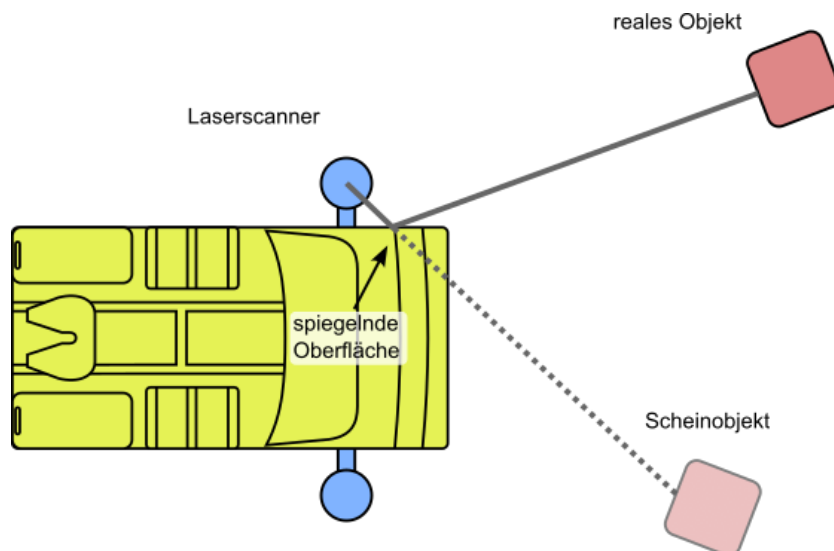


Abbildung 56: Scheinobjekt aufgrund von Reflexionen an der Fahrzeugseite.

Abhilfe konnte durch eine weitere Filterung der auf Kollision zu bewertenden Punkte geschaffen werden. Gebiete, die nicht im Sichtbereich des jeweiligen Scanners liegen, werden nicht im Algorithmus berücksichtigt. Abbildung 57 visualisiert die dazu definierten Bereiche um das Fahrzeug. Detektionen werden so einer Plausibilitätsprüfung unterzogen.

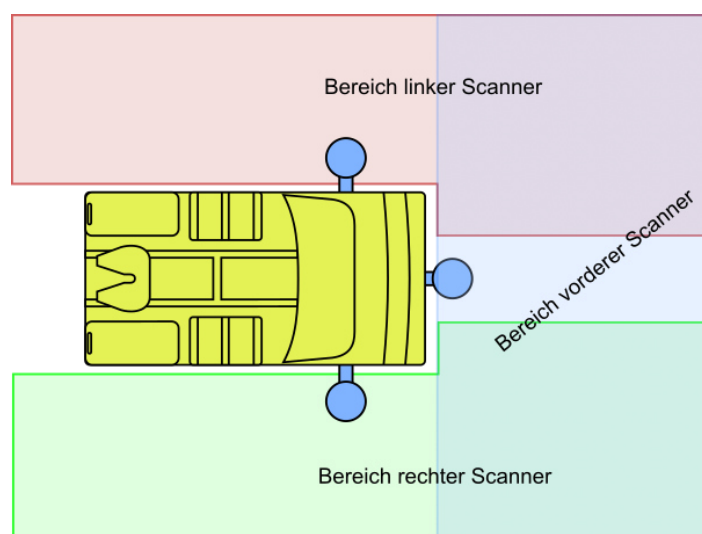


Abbildung 57: Berücksichtigte Bereiche je Scanner.

Miteinbezug des Sattelauflegers in die Kollisionswarnung

Die Berücksichtigung des Sattelauflegers bei der Überprüfung auf Hindernisfreiheit der umgebenden Punktwolken im vorhergesagten Fahrschlauch erfolgt auf die gleiche Weise wie beim Zugfahrzeug: Ein Fußabdruck des Auflegers in der zum aktuellen Zeitschritt vorliegenden Position wird iterativ mehrere Zeitschritte voraus projiziert und das so überstrichene Volumen auf mögliche Hindernisse untersucht. Abbildung 58 zeigt die Fußabdrücke des Sattelzuges während der langsamen Vorbeifahrt an geparkten LKW. Der Sattelschlepper dort ist in Grün, der Sattelaufleger in Blau eingezeichnet.

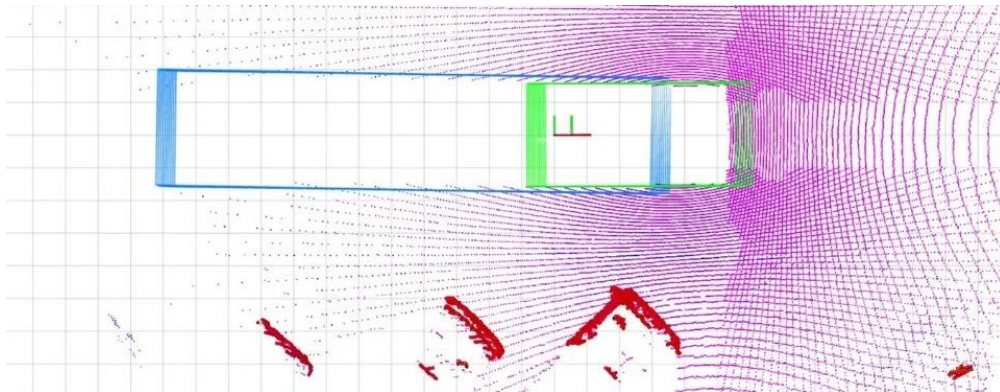


Abbildung 58: Miteinbezug des Trailers (blau) in Hinderniserkennung. Unten im Bild: parkende LKW.

Hierfür ist die Kenntnis über die geometrische Position der Kupplung am Zugfahrzeug, die Abmessungen des Trailers inklusive Position des Königszapfens und der Achsen am Trailer sowie des Winkels zwischen Zugfahrzeug und Trailer, Knickwinkel genannt, Voraussetzung. Der Knickwinkel muss fortlaufend übertragen werden. Hierfür wird die aufgebaute Kommunikationsstruktur über Nachrichten im Netzwerk genutzt, über die auch alle anderen Sensordaten übertragen werden.

4 Durchführung der Testfahrten und des Pilotbetriebs (Deutsche Bahn AG)

4.1 Erprobung und Optimierung des Fahrzeugs (AP 4.1)

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden die fahrzeugseitigen Voraussetzungen für den Test- und Pilotbetrieb geschaffen. Da diese Arbeiten eng mit der Fahrzeugentwicklung verbunden sind, wurden sie im Kap. 3 detailliert beschrieben.

Die Systeme zur Trailerlokalisierung und Hinderniserkennung sind so entwickelt, dass sie von den Systemen der MAN bei Bedarf in der jeweiligen Fahrsituation über eine Netzwerknachricht aktiviert werden können. Zu Beginn der Erprobung im Live-Betrieb des Fahrzeugs wurde das Zusammenwirken der Komponenten im Gesamtsystem getestet und verbessert. Herausfordernd war hierbei die Komplexität der Netzwerktechnik im Fahrzeug.

Für die Optimierungen der Detektionsalgorithmen und Analyse möglicherweise auftretender Anomalien eignen sich aufgezeichnete Messdaten der Umgebungserfassung besonders gut. Grund hierfür ist, dass iterative Anpassungen der Algorithmen mehrfach gegen die exakt gleichen Eingangsdaten getestet werden können. Daher wurde auch bei der Erprobung zu großen Teilen mit aufgezeichneten Daten gearbeitet und die Optimierungen durchgeführt.

4.2 Testphase (AP 4.2) und Pilotbetrieb (AP 4.3)

Im Juli 2021 konnten erste Messfahrten zur Erhebung von Sensordaten auf dem Terminal- und Depotgelände durchgeführt werden. Diese wurden im Regelbetrieb durchgeführt, um reale Betriebssituationen und herkömmliches Verkehrsaufkommen aufnehmen zu können. Dabei konnten bereits einige Anforderungen für den Regelbetrieb identifiziert werden, wie z. B. die Notwendigkeit des Grünschnitts entlang der gesamten Fahrbahnen.

Auf Basis der Werksanalyse und der Auswertungen der Mess- und Befragungsergebnisse wurden die Prozessabläufe von operativen Experten am Terminal und Depot überprüft und gegebenenfalls angepasst, um den Regelbetrieb mit einem automatisierten Fahrzeug sicherzustellen und Ableitungen für einen zukünftigen Betrieb zu treffen. Die operativen Experten spielten eine entscheidende Rolle in der Auswertung aufgrund ihrer langjährigen Erfahrung im Terminal- und Depotbetrieb. Dadurch wurde sichergestellt, dass auch besondere Abweichungsfälle wie saisonale Veränderungen, tagesbedingte Stoßzeiten, spezielle Witterungsbedingungen und Störfälle (z. B. Kranausfälle, Probleme bei der Verladung) angemessen berücksichtigt wurden. So wurde in Absprache mit den Partnern entschieden, dass dem ANITA-LKW eine feste Parkposition auf dem Anmeldeparkplatz des Terminals zugewiesen wird, von wo die digitalisierte Anmeldung und der Container-Check

durchgeführt wurden. Insbesondere die Beherrschung dieser Sondereffekte waren entscheidend für einen reibungslosen Betrieb.

Um die Test- und Pilotphase optimal durchführen zu können, wurde eine HARA für den Versuchsträger durchgeführt und eine Risikoanalyse anhand der Prozessabläufe der Leercontainerumfuhr vorgenommen. Dazu wurden zunächst die möglichen Gefahrensituationen, die durch den Piloten entstehen können, beschrieben und deren Eintrittswahrscheinlichkeit und mögliches Schadensausmaß bewertet. Anschließend wurden risikobeherrschende Maßnahmen identifiziert und konkrete Regelungen abgeleitet. Jede Gefährdung muss in diesem Verfahren auf ein akzeptables Niveau gesenkt werden, was vor allem durch den Einsatz des Sicherheitsfahrers im ANITA Pilotprojekt gewährleistet wurde. Ziel dieses Vorgehens ist zum einen eine vollständige Erhebung der möglichen Gefährdungen und einer Ableitung von Handlungsbedarfen für das Konsortium und / oder operative Mitarbeiter. Auf der anderen Seite sollen die Erkenntnisse für eine weitere Betrachtung und Einschätzung des Realeinsatzes über die Piloterprobung in ANITA hinaus dienen.

Auf Basis eines gemeinsamen Beschlusses des Konsortiums wurde der Beginn der Testphase auf den 26.05.2023 verlegt, da es im Laufe des Projektes zu Verzögerungen beim Fahrzeugaufbau kam. Der Testbetrieb wurde bis zum 03.09.2023 durchgeführt. Das ANITA-Fahrzeug war im Laufe der Testphase zumeist für zwei bis drei Tage hintereinander (je Woche) im Testbetrieb auf dem Gelände der DUSS und DBIS eingesetzt. Jede Woche wurden die Testergebnisse ausgewertet um das Automatisierungssystem iterativ weiterzuentwickelnd. Aufgrund des gewählten Ansatzes gingen Test- und Pilotphase nahtlos ineinander über. Nachdem Fahrzeug- und Kommunikationssystem einen ausreichenden Grad an Stabilität erreicht hatten und alle Arbeiten abgeschlossen waren, begann am 04.09.2023 die Pilotphase.

Da die Beurteilung der Leistungsfähigkeit von autonomen Systemen bzw. Fahrzeugen nicht eindeutig definiert ist, orientierte sich das Konsortium an den übergeordneten Charakteristika von autonomen Systemen. Die Parameter *Entscheidungsfähigkeit*, *Selbstlernfähigkeit*, *Selbsterklärungsfähigkeit*, *Resilienz*, *Robustheit*, *Kooperativität*, *Ressourcenadaptation*, *Proaktivität*, *Performanz*, *Skalierbarkeit*, *Sicherheit*, *Übertragbarkeit* und *Flexibilität* (z. B. Wahlster 2017) konnten durch die Multi-Agenten-Abhängigkeit und die damit verbundenen Varianzen nicht einzeln sinnvoll quantifiziert, sondern nur qualitativ eingeordnet werden. So sind bspw. die Parameter *Performanz* oder *Flexibilität* nicht allein in der Entwicklungs- oder Steuerungshand des Konsortiums, sondern noch von anderen Agenten abhängig. Als Basis für die Weiterentwicklung wurden die Aspekte *Robustheit* und *Resilienz* in den Fokus gestellt. Hiermit verbunden ist auch ein fehlersuchender Ansatz (Fail Fast Fail Often – FFFO). Der FFFO-Ansatz wurde für die Erprobungs- und Testszenarien gewählt, da er ein Fehlerauftreten wahrscheinlicher werden lässt, wodurch die Lösung des Fehlers getriggert wird, welches sich positiv auf die System-Resilienz auswirkte. Auf diese Weise konnten, die in den Tests identifizierten Defizite zeitnah ausgebessert werden, um die betroffenen

Prozessschritte anschließend erneut in der Praxis zu testen. Mit Blick auf die Kommunikationsschnittstellen sowie die hoch automatisierte Fahrzeugtechnik konnten durch dieses Vorgehen die Prozessstabilität sowie die Entwicklungsgeschwindigkeit deutlich beschleunigt bzw. verbessert werden. Zum Schluss der Pilotphase konnten bis zu 12 Missionen in einem Tag durchgeführt werden.

Vor Beginn der Testphase wurden Informationsveranstaltungen und Schulungen der Standort-Mitarbeitenden Anfang März 2023 in Ulm durchgeführt. Allen Mitarbeitenden wurden die Hintergründe, Ziele und das Vorgehen beschrieben sowie unterschiedlichste Fragen beantwortet werden. Insbesondere die Eigenschaften und Verhaltensweisen und die damit einhergehenden Besonderheiten des automatisierten LKW waren Hauptziel der Präsentation. Die operativen Mitarbeitenden, die eine unmittelbare Schnittstelle zum ANITA-LKW hatten (u.a. Disponenten, Kranführer), wurden in einer gesonderten Schulung näher über die Funktions- und Verhaltensweisen des LKW aufgeklärt. Dazu wurden Schulungsunterlagen angefertigt und den Mitarbeitenden zur Verfügung gestellt. Zudem wurde der mehrsprachige Informationsflyer – auf dem auch Ansprechpartner vor Ort aufgelistet waren – am schwarzen Brett der Standorte ausgehängt und in Papierform bereitgestellt. Neben den Informationsveranstaltungen hat sich das Konsortium auf die Erstellung eines mehrsprachigen Informationsflyers geeinigt, der die Terminalmitarbeiter und -nutzer über die Ziele und die Umsetzung des Pilotprojektes informierte. Damit auch externes Personal anderer Transportdienstleister und Spediteure, die das Terminal nutzen, über den Piloten informiert wurden, wurde ein Straßenschild am Eingang des Geländes positioniert, das die wichtigsten Eigenschaften des Fahrzeugs bildlich darstellte. Zusätzlich wurden alle Terminalnutzer per E-Mail informiert, dass ein Automatisierungsprojekt auf dem Terminal Ulm durchgeführt wird. Innerhalb des DB-Konsortiums wurden weitere Handlungsbedarfe wie die Einbindung des Betriebsrates und eine Datenschutzbetrachtung identifiziert und angestoßen. Somit wurde der Informationspflicht für die Terminalnutzer zu dem Forschungsprojekt nachgegangen.

Die zuvor festgelegten prozessualen Abläufe wurden kurz vor Beginn der Testphase geprüft und nach dem Start der Tests zum Teil angepasst.

Die DUSS und die DBIS stellten für den Pilotbetrieb ein reales Logistikumfeld (Container-Umschlagterminal und Container-Depot) zur Verfügung. Zusätzlich zum regulären operativen Betrieb wurden Ladeeinheiten, die Terminal- bzw. Depotinfrastruktur sowie Personal für den Pilotbetrieb bereitgestellt. Um einen reibungslosen organisatorischen Ablauf während der Projektphase vor Ort sicherzustellen, wurden im Vorfeld die auf dem Terminalgelände tätigen Mitarbeiter über den Testbetrieb informiert und in die Planungen integriert. Mitarbeiter, die direkt am Pilotbetrieb beteiligt waren, wurden je nach Bedarf geschult und / oder speziell aufgeklärt (siehe AP 4.2). DUSS und DBIS übernahmen die Dokumentation der Pilotabläufe sowie die Identifikation von kritischen Prozessschritten, die Einfluss auf die Arbeitssicherheit oder die Effizienz der Prozessabläufe hatten.

4.3 Auswertung und Ausblick (AP 4.4)

Die DBIS und die DUSS haben die Ergebnisse der Pilotphase im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf die Logistikprozesse im Depot und im Terminalablauf ausgewertet. Dabei wurde insbesondere die Integration des autonomen Fahrzeugs in den Terminalverkehr und -ablauf betrachtet, wie beispielsweise das Anstoßen der Mission am Terminaleingang, die Fahrt im Terminal zur Zielposition, das Verhalten während des Kranvorgangs sowie die Fahrt zum Terminalausgang. Als ein zentraler KPI der Performanz-Analyse wurde die Umlaufzeit verwendet. Insgesamt wurden 215 Missionen ausgewertet, wovon ca. 1/3 auf Mockup-Szenarien basierten, ca. 1/3 wurden hybrid (reale Fahrzeuge und Mockup TOS oder Mockup Fahrzeug und reale TOS) durchgeführt und ca. 1/3 erfolgten unter Einbindung von allen operativen „Systemen“ (LKW, TOS, Personen). Im Vorfeld ist der autonome LKW knapp 200 Missionen ohne Anbindung an das DKS (Broker) gefahren, um das autonome System in dem neuen Umfeld zu testen und weiterzuentwickeln. Real wurden an 40 Testtagen Missionen auf dem Depotgelände und dem Terminalgelände gefahren. Bei der Auswertung der Daten wurden autonome Missionen mit klassischen Missionen verglichen und dabei Hochzeiten von Nebenzeiten differenziert. Einen Überblick gibt die nachfolgende Abbildung 59.

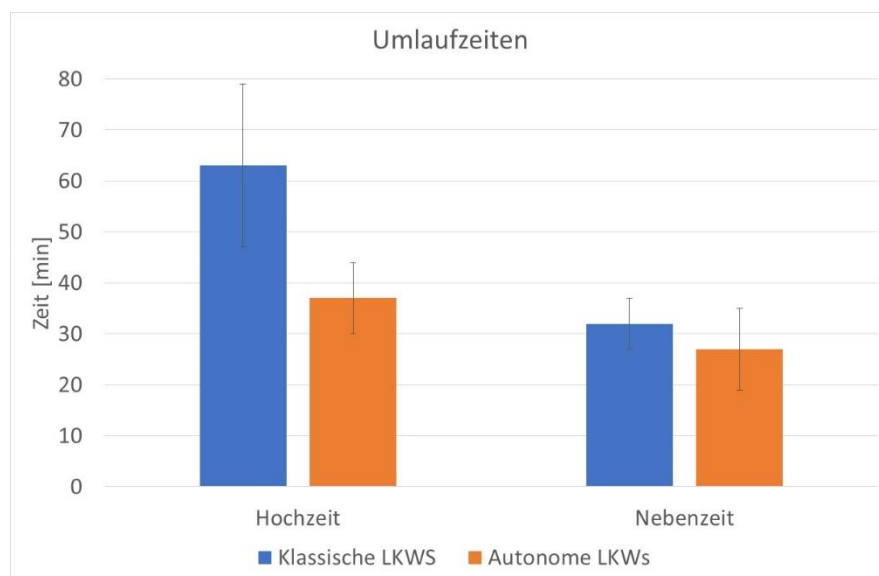


Abbildung 59: Mittlere Umlaufzeiten (Median) für Umfuhren klassischer LKW und autonomer LKW.

Im Verlauf der Umfuhren erfolgten rund 5.000 Systemübergaben und „Digital Handshakes“ zwischen den Systemen. Bei den Simulationen wurden rd. 200.000 Fahrzeuge einbezogen und Fahrten über rd. 500.000 km mit unterschiedlichen Auslastungen durchgeführt.

In der Auswertung des Pilotbetriebs zeigte sich, dass sich die Systemstabilität mit jeder gefahrenen Mission weiter verbesserte und Kommunikationsfehler zunehmend seltener wurden. Auch bauten sich bei den beteiligten Mitarbeitenden auf dem Depot der DBIS und dem DUSS-Terminal Erfahrungswerte auf, sodass Bedienerfehler mit zunehmender Dauer des Pilotbetriebs nur noch vereinzelt auftraten. Die Auswertung aller Daten hat gezeigt, dass

die Durchlaufzeit einer Terminalumfuhr im betrachteten Anwendungsfall in der Spitze um bis zu 41% reduziert werden konnte. Obwohl der ANITA-LKW aufgrund regulativer Vorgaben mit einer langsameren Grundgeschwindigkeit als die manuell gefahrenen Terminalumfuhren operierte, absolvierte er den Durchlauf einer Terminalumfuhr bei jeder betrieblichen Lage und Auslastung des Terminals bzw. des Depots signifikant schneller. Hinsichtlich der betrieblichen Lage wurde im Monitoring der Pilotphase, wie bereits erwähnt, zwischen Haupt- und Nebenzeit unterschieden. In der Hauptzeit war die Auslastung des Terminals, und somit auch die Dichte des Verkehrs auf dem Terminal, deutlich höher als in der Nebenzeit, bei welcher es sich vorrangig um Abend- und Nachtstunden handelte.

Der Mittelwert einer manuell gefahrenen Terminalumfuhr in der Hauptzeit liegt bei rd. 60 Minuten, der ANITA-LKW benötigte unter den gleichen Rahmenbedingungen im Mittel rd. 40 Minuten. Die Differenz von 20 Minuten entspricht einer Reduktion der Durchlaufzeit von 33%. In der Betrachtung der Median-Werte verfestigt sich dieses Ergebnis noch zusätzlich. Während ein manuell gefahrener LKW im Median 63 Minuten für einen Umlauf benötigte, waren es beim ANITA-LKW im Median nur 37 Minuten. Die Differenz von absolut 26 Minuten entspricht einer Reduktion der Median-Durchlaufzeit von 41%. Da gerade die Hauptzeit, die aus betrieblicher Sicht die kritischste Zeit ist, ist das Ergebnis als sehr positiv zu bewerten. Eine Reduktion der Durchlaufzeit ist daher im weiteren Sinne mit einer Steigerung der Umschlagkapazität gleichzusetzen.

Der Mittelwert einer manuell gefahrenen Terminalumfuhr in der Nebenzeit liegt bei 34 Minuten, der ANITA-LKW benötigte unter den gleichen Rahmenbedingungen im Mittel 23 Minuten. Die Differenz von 11 Minuten entspricht einer Reduktion der Durchlaufzeit von 32%. In der Betrachtung der Median-Werte bestätigt sich auch dieses Ergebnis: Während ein manuell gefahrener LKW im Median 32 Minuten für einen Umlauf benötigte, waren es beim ANITA-LKW im Median hingegen 27 Minuten. Die Differenz von absolut 5 Minuten entspricht einer Reduktion der Median-Durchlaufzeit von 16%.

Bei einer einheitlichen Betrachtung der Mittelwerte zeigt sich, dass der digitale LKW dem manuell gesteuerten, analogen LKW bei jeder betrieblichen Lage hinsichtlich der Reduktion der Durchlaufzeit einer Terminalumfuhr überlegen ist. Die Durchlaufzeit konnte im Schnitt um 1/3 reduziert werden. Gleichzeitig hat sich die Prozessstabilität im Ablauf einer Terminalumfuhr deutlich verbessert. Die Varianzen der einzelnen Durchläufe sind beim manuell gesteuerten, analogen LKW deutlich größer. Beim digitalen ANITA-LKW hingegen liegen die einzelnen Umläufe von ihrer Dauer her dicht beieinander, was positiv in Hinsicht auf die Planung und ihre Qualität zu beurteilen ist. Hierzu trägt unter anderem die digitale Prozessplanung und -steuerung bei. Hierdurch, aber auch durch den Einsatz von Simulationssystemen – kontinuierliche aber auch diskrete – lässt sich die Variation in der Vorhersage des Systemverhaltens augenfällig verbessern. So liegt der Variationskoeffizient¹⁴ für die Vorhersage von Umläufen ohne digitale Unterstützung bei rd.

¹⁴ Je niedriger desto besser

30, mit digitalem Support erreicht er einen Bereich zwischen rd. 20 und rd. 10, was eine erhebliche Verbesserung darstellt und sich positiv auf die Fitness des Systems auswirkt, insbesondere bzgl. Resilienz, Planbarkeit und Flexibilität.

Aus Informationstheoretischer Sicht kann somit von einem Informationsgewinn gesprochen werden bzw. von einer höheren Verwertbarkeit von nützlicher Information.

4.4 Lessons Learned

Im Rahmen der Durchführung des Projektvorhabens ANITA zur Pilotierung autonomer LKW für die Terminalumfuhren im DUSS-Terminal Ulm und dem DBIS-Depot in Ulm sollten die zentralen „Take Aways“ für Folgeprojekte und die zukünftige Integration dieser Technologie zusammengefasst werden. Es zeigte sich, dass es zahlreiche Wechselwirkungen zwischen hoch automatisierten mobilen Anwendungen und den bestehenden Systemlandschaften zu berücksichtigen gilt.

Wie bereits beschrieben, erfordert die Einführung eines autonomen LKW im Logistikprozess gewisse Anpassungen. Die personellen Ressourcen vor Ort haben eine entscheidende Rolle für den Erfolg des Projekts gespielt. Ihre offene und aufmerksame Haltung gegenüber der neuen Technologie ermöglichte eine reibungslose Implementierung und Anpassung in den Betriebsablauf. Dies war besonders wichtig, da die Integration fortschrittlicher Technologien nicht nur technische, sondern auch kulturelle Anpassungen innerhalb der Organisation erfordert.

Der autonome LKW hat sich als ein wesentlicher Faktor für die Steigerung der Effizienz erwiesen. Durch seine Fähigkeit, die Durchlaufzeiten der Terminalumfuhren unter verschiedenen betrieblichen Bedingungen zu reduzieren, konnte eine deutlich stabilere Prozessführung erreicht werden. Diese Effizienzvorteile sind ein klarer Indikator dafür, dass die weitere Verbreitung autonomer LKW wesentliche Vorteile für das Terminalmanagement und die Logistikprozesse mit sich bringen kann. Der Einsatz autonomer LKW ermöglicht darüber hinaus die Glättung von Lastspitzen in den Terminals, da zu Stoßzeiten flexibler disponiert werden kann.

Jedoch wurde deutlich, dass der Einsatz dieser Technologie als Teil eines Gesamtsystems zu betrachten ist, in dem insbesondere die Kommunikationsprozesse und -schnittstellen eine kritische Rolle spielen. Die Kommunikation zwischen dem autonomen LKW und den Steuerungssystemen des Terminals hat sich als besonders herausfordernd erwiesen. Kommunikationsabbrüche oder -fehler führten in der Regel zum Abbruch einer Mission, was die Notwendigkeit einer stabilen und zuverlässigen Kommunikationsinfrastruktur unterstreicht.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass der volle Nutzen der Automatisierung erst dann realisiert werden kann, wenn ein signifikanter Anteil der LKW im Terminal automatisiert und bestenfalls auch vernetzt ist. Ein einzelner autonomer LKW inmitten analoger, manuell

gesteuerter Fahrzeuge, kann nicht sein volles Potenzial entfalten. Dies deutet darauf hin, dass für eine maximale Effizienzsteigerung und Prozessstabilität eine weitreichende Umstellung auf autonome Fahrzeuge erforderlich ist.

Die lange Testphase vor Ort hat sich als besonders vorteilhaft erwiesen. Sie ermöglichte, auftretende Probleme unmittelbar zu identifizieren und zu beheben, was eine kontinuierliche Verbesserung und Anpassung der Technologie an die spezifischen Bedingungen des Terminals erlaubte. Diese Erfahrung unterstreicht die Bedeutung einer gründlichen Test- und Anpassungsphase bei der Einführung neuer Technologien in komplexe Systemlandschaften.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die weitere Verbreitung und Integration autonomer LKW in die Terminal- und Depotinfrastruktur ein hohes Maß an Aufmerksamkeit und Ressourceneinsatz erfordert. Die systemische Implementierung dieser Technologie in bestehende Landschaften stellt eine bedeutende Herausforderung dar, bietet jedoch gleichzeitig die Chance, die Effizienz, Stabilität und Nachhaltigkeit logistischer Prozesse signifikant zu verbessern. Es ist daher entscheidend, die gewonnenen Erkenntnisse zu nutzen, um die Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Skalierung und Integration der digitalen LKW-Technologie zu schaffen.

Eng verbunden mit der Skalierbarkeit ist die Berücksichtigung von regionalen und nationalen Sense-Making Loops. Natürlich besteht im Themenfeld des autonomen Fahrens bzw. Transports ein internationaler Wettbewerb, gleichwohl unterscheiden sich die Anforderungen an autonome Fahrzeuge bspw. in Asien und Europa bzw. Deutschland wesentlich, weshalb auch die Sense-Bewertung bzw. die Asset-Auswahl unterschiedlich ist. Ein sinnhafter Einsatz von digitalisierten bzw. automatisierten oder autonomen Fahrzeugen ergibt sich unter den hiesigen Anforderungen nicht erst beim Erreichen einer Fahrerlosigkeit, sondern durch die bessere Abwicklung von Prozessen im System. Entscheidend ist hierbei die Berücksichtigung der Systemperspektive und nicht der Perspektive eines einzelnen Agenten bzw. Fahrzeugs.

Nimmt man eine Makro-Systemperspektive ein, d.h. Terminals von unterschiedlichen Betreibern und unterschiedliche Fahrzeughersteller, so stellt sich die Frage nach Roll-out Szenarien. Da die Domain sehr kleinteilig organisiert ist, erscheint es kaum möglich eine zentrale Intelligenz zu schaffen. Zwar sollte es ein „one source of truth“ geben, allerdings ist die Intelligenz verteilt im Netzwerk. Das Zusammenführen der verschiedenen Motive in eine einheitliche Verhaltensnomenklatur könnte gut über „Deontic Reasoning“ abgebildet werden.

Wesentlich für die Weiterentwicklung des Systems ist ferner die Frage, wie verschiedene Akteure, d.h. verschiedene Fahrzeuge von unterschiedlichen Herstellern mit verschiedenen Terminal Operation Systemen von unterschiedlichen Betreibern und unterschiedlichen Verlademaschinen kommunizieren. Die Entstehung einer Lösung – also eines gemeinsamen Standards – ist auch hier aus einer gemeinsamen Arbeit im Netzwerk zu sehen. Wir schlagen hier die Einführung von „black lists“ und „white lists“ vor, die von unterschiedlichen Seiten zu Fragen der Schnittstellen, Datenorganisation etc. genährt werden können.

5 Projektmanagement

5.1 Konsortialprojektmanagement (MAN Truck & Bus; AP 7.1)

MAN Truck & Bus koordinierte das Konsortialprojektmanagement mit der Unterstützung der Firma AlbrechtConsult GmbH als externem Projektbüro.

Als Konsortialführer musste MAN Truck and Bus SE sicherstellen, dass eine fortlaufende Evaluation des Projektes auf Gesamtprojektebene durch ein Projektmanagement stattfindet. Regelmeetings des Konsortiums wurden monatlich durchgeführt, um den aktuellen Projektstatus, die nächsten Schritte und ggf. Maßnahmen bei bestehenden Risiken oder Abweichungen zu besprechen. Aufgrund der coronabedingten Einschränkungen wurden die Meetings virtuell abgehalten und sind aus praktischen Gründen bis zum Projektende so geblieben. Zur Unterstützung der Projektorganisation und -dokumentation wurde ein Projektbüro beauftragt. Alle Projektmeetingdokumente wurden in einem, von der DB AG zur Verfügung gestellten, SharePoint abgelegt.

Um die strategischen Themen zu steuern, wurde ein Steuerkreis mit den Vertretern der Projektpartner und des Fördergebers zusammengesetzt. Der Steuerkreis stellte das Entscheidungsgremium dar, welches die strategische Zielerreichung sicherstellte. Dort wurden auch die wesentlichen Projektfortschritte, sowie Meilensteinverschiebungen besprochen. Die Steuerkreistreffen haben am 16.09.2021 und 17.11.2022 stattgefunden; Steuerkreistreffen finden weniger häufig statt als operative Konsortialtreffen.



Abbildung 60: Demostart bei der Abschlusspräsentation.

Für Themen der Außenkommunikation wurde ein ANITA-Kommunikationsgremium benannt, welches sich ebenfalls in virtuellen Meetings beraten hat. Im Rahmen des Gremiums wurden die Öffentlichkeitsarbeiten abgestimmt. Eine Konsortial-Website mit verschiedenen Erklärvideos zu ANITA wurde erstellt: [Autonome Innovation im Terminal Ablauf | MAN \(anita.digital\)](https://www.anita.digital)¹⁵. Zu Beginn des Projekts hat das Kommunikationsgremium ein Presseevent organisiert, um die Projektziele vorzustellen. Die Halbzeitpräsentation sowie die Abschlusspräsentation, die respektiv am 24.05.2022 und am 30.09.2023 stattgefunden haben, wurden im Rahmen dieses Arbeitskreises organisiert. Abbildung 60 zeigt ein Foto vom Start der Abschlussdemonstration. Weiterhin wurden dort verschiedene Publikationen, auf sozialen Netzwerken oder in der Presse, im Lauf des Projektes abgestimmt und koordiniert.

Darüber hinaus haben außerplanmäßige Treffen stattgefunden, um spezifische Themen zu klären wie z. B. die Bearbeitung des Risikomanagementkonzepts im Projekt.

5.1.1 Verantwortlichkeiten der Projektpartner

Der Verantwortungsbereich aller Projektpartner wurde im Konsortialvertrag festgelegt:

MAN Truck & Bus (Projektleiterin: Amélie Jacquemart-Purson)

- Konsortialführerschaft im Rahmen des Projektes, insbesondere Koordinierung der Zusammenarbeit der Partner;
- Entwicklung, Aufbau und Bereitstellung des autonomen Fahrzeugs für die Hub-Applikation einschließlich Technik und Fahrer (Fahrer ist stets aus Sicherheitsgründen erforderlich);
- Instandhaltung des Versuchsträgers während der Projektlaufzeit, bspw. Austausch von Rechnern bei Defekt;
- Entwicklung der Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Hub, um die erforderliche Kommunikation für die Durchführung der Missionen gewährleisten zu können;
- Organisation und Koordination der unternehmensübergreifenden Testfahrten auf den unterschiedlichen Terminal- und Depotgeländen von DUSS und DBIS inkl. aller Vorbereitungsmaßnahmen (Implementierung von risikominimierenden Maßnahmen, Durchführung von Schulungen usw.).

¹⁵ <https://www.anita.digital/de/homepage.html>

DBIS (Projektleiter: Jens Proese)

- Sicherstellung eines regelmäßigen Zugangs zum DBIS-Containerdepot in der Hugo Junkers Str. 4, 89160 Dornstadt, für durch andere Partner auf dem Depot-Gelände zu erbringende Leistungen (z. B. Systemanalyse, Tests, Kartenerstellung) und die Präsentation des Arbeitsfortschritts vor Vorständen, Management und Mitarbeitern der Partner nach erfolgter Terminabstimmung und unter Einhaltung der Vorschriften der Arbeitssicherheitsbestimmungen. Die Beauftragung einer Kartenerstellung ist nicht Teil der von DBIS zu erbringenden Leistungen;
- Bereitstellung eines Ladebereichs innerhalb des Depots, der für Tests genutzt werden kann;
- Sicherstellung, dass ein Container oder Auflieger innerhalb des Depots zu Testzwecken von einem Kran oder Reachstacker auf- und abgenommen werden kann;
- Erneuerung von Fahrstreifenmarkierungen entlang der zu fahrenden Strecke auf dem Asphalt; darüberhinausgehende Markierungen oder ähnliche Hilfsmittel werden bei Bedarf in Absprache mit DBIS von dem Partner vorgenommen, der sie für die Erbringung der ihm obliegenden Leistungen benötigt;
- Einräumung der Möglichkeit für Partner, in Absprache mit DBIS Sensorik, z. B. zur Fußgängererkennung, anzubringen. Für die Anbringung ist der jeweilige Partner, d. h. nicht DBIS, verantwortlich;
- Einbindung der Versuchsträger in den regulären Ablauf während des Pilotbetriebs nach erfolgter Terminabstimmung und unter Einhaltung der Vorschriften der Arbeitssicherheitsbestimmungen, bspw. durch:
 - Reservierung eines Abfertigungsplatzes,
 - Sicherstellung freier (Sensor-)Sicht auf feste Infrastruktur (keine Verdeckung durch Container o. ä.),
 - Bereitstellung geeigneter Freiflächen für Auf- und Absattelmanöver;
- Einräumung der Möglichkeit nach Rücksprache mit DBIS, Versuchsträger wenige Tage bspw. im Rahmen von mehrtägigen Tests auf dem Gelände abzustellen, wobei der Betrieb auf dem Terminal-Gelände nicht gestört werden darf;
- Vorbereitung und ggf. Begleitung von Testfahrten u. a. durch Einweisung in betriebliche Abläufe und Durchführung notwendiger Aufgaben im Realbetrieb nach erfolgter Terminabstimmung und unter Einhaltung der Vorschriften der Arbeitssicherheitsbestimmungen;
- Ermöglichung eines Zugangs zum DBIS IT-System im Rahmen der im DB-Konzern geltenden IT-Sicherheitsbestimmungen, sodass eine IT-Applikation als Plattform für die Missionsplanung angebunden werden kann;

- Eigene Anpassung von IT-Nutzeroberflächen, Schnittstellen etc. sodass eine IT-Applikation als Plattform für die Missionsplanung angebunden werden kann (nach Rücksprache mit der HS Fresenius, Deon und MAN).

DUSS (Projektleiter: Thomas Wunsch)

- Sicherstellung eines regelmäßigen Zugangs zum DUSS-Umschlagterminal in der Albrecht Berblinger Str. 2, 89160 Dornstadt, und die Präsentation des Arbeitsfortschritts vor Vorständen, Management und Mitarbeitern der Partner nach erfolgter Terminabstimmung und unter Einhaltung der Vorschriften der Arbeitssicherheitsbestimmungen. Die Beauftragung einer Kartenerstellung ist nicht Teil der von DUSS zu erbringenden Leistungen;
- Bereitstellung eines Ladebereichs innerhalb des Terminals, der für Tests genutzt werden kann;
- Sicherstellung, dass ein Container oder Auflieger innerhalb des Terminals zu Testzwecken von einem Kran oder Reachstacker auf- und abgenommen werden kann;
- Erneuerung der Fahrstreifenmarkierungen entlang der zu fahrenden Strecke auf dem Asphalt; darüberhinausgehende Markierungen oder ähnliche Hilfsmittel werden bei Bedarf in Absprache mit DUSS von dem Partner vorgenommen, der sie für die Erbringung der ihm obliegenden Leistungen benötigt;
- Einräumung der Möglichkeit für Partner, in Absprache mit DUSS Sensorik, z. B. zur Fußgängererkennung, anzubringen;
- Einbindung der Versuchsträger in den regulären Ablauf während des Pilotbetriebs, bspw. durch:
 - Reservierung eines Abfertigungsplatzes,
 - Bereitstellung geeigneter Freiflächen für Auf- und Absattelmanöver;
- Vorbereitung und ggf. Begleitung von Testfahrten u. a. durch Einweisung in betriebliche Abläufe und Durchführung notwendiger Aufgaben im Realbetrieb;
- Ermöglichung eines Zugangs zum DUSS IT-System im Rahmen der im DB-Konzern geltenden IT-Sicherheitsbestimmungen, sodass eine IT-Applikation als Plattform für die Missionsplanung angebunden werden kann (siehe § 1 Abs. 7);
- Eigene Anpassung von IT-Nutzeroberflächen, Schnittstellen etc. sodass eine IT-Applikation als Plattform für die Missionsplanung angebunden werden kann (nach Rücksprache mit der HS Fresenius, Deon und MAN).

Götting KG (Projektleiter: Nils Kluge)

- Entwicklung eines fahrzeugseitigen Systems zur Ortung von Sattelaufliegern sowie Entwicklung eines fahrzeugseitigen Systems zur Detektion von Objekten in der Fahrzeugumgebung;
- Integration der o. g. Systeme in einen von MAN zur Verfügung gestellten Versuchsträger (LKW) und gemeinsame Erprobung des Systems in Absprache mit MAN;
- Instandhaltung der o. g. Systeme während der Projektlaufzeit, bspw. Austausch von Rechnern bei Defekt.

Hochschule Fresenius (Projektleiter: Prof. Dr. Christian T. Haas)

- Identifikation von Systemregelwerken die für Fahrzeugbewegungen auf dem DUSS-Terminal und DBIS-Depot relevant sind;
- Entwicklung des Message Flows und der Missionsplanung;
- Aufbau von Simulationen zur Performanzanalyse;
- Prüfung von Transferfunktionen auf andere Terminalstrukturen und Fahrzeugkategorien.

Deon Digital Deutschland GmbH (als Unterauftragnehmer der HS Fresenius, Projektleiter: Christian Altmann, Anselm Pilz)

- Entwicklung einer IT-Applikation, die als Plattform für die Missionsplanung und Transaktionsübermittlung zwischen den IT-Systemen (DUSS, DBIS, LKW) verwendet wird;
- Erstellung einer Schnittstelle inklusive Dokumentation, die von den Akteuren der Plattform eigenständig genutzt werden können;
- Erstellung eines einheitlichen Datenmodells inklusive Dokumentation welches auf Basis der bisher verwendeten Datenmodelle der Akteure entwickelt wird.

DB AG (Assoziierter Partner, Projektleiter: Dr. Dustin Schöder)

- Unterstützung der Hochschule Fresenius bei der Regelwerkentwicklung vor allem mit logistikspezifischem Know-how, welches vor allem durch übergeordnete Koordinierung der DB-Töchter DUSS und DBIS gewährleistet wird;
- Unterstützung bei der Identifizierung von Anforderungen für den Einsatz des Fahrzeugs auf dem Terminal und dem Depot in Absprache mit den Partnern DUSS und DBIS;

- Unterstützung der hauptverantwortlichen Partner bei der Fortentwicklung des Gesamtsystems, insbesondere hinsichtlich der logistischen Anwendbarkeit; die Betrachtung wird um zusätzliche Terminals und Depots von DUSS / DBIS und darüber hinaus weitere Anwendungsfelder aus der gesamten Logistik- und Transportbranche erweitert;
- Analyse der bestehenden Infrastruktur und der Anforderungen aus der Praxis, sowie die Transformation in ein autonomes Transportkonzept im Mischverkehr;
- Koordination und Planung der unternehmensübergreifenden Testfahrten auf den unterschiedlichen Terminal- und Depotgeländen von DUSS und DBIS. Dabei Unterstützung der hauptverantwortlichen Partner bei der Optimierung des Fahrzeugs hinsichtlich des Einsatzes im realen Logistikumfeld mit einer Validierung der Funktionsumfänge und Prozesse;
- Analyse der veränderten Gesamtprozessabläufe durch die Auswertungen der Mess- und Befragungsergebnisse auf dem Depot und dem Terminal, sowie die Unterschiede beider Systeme;
- Unterstützung bei der Weiterentwicklung und Anpassung der Regelwerke und der Missionsplanung für den automatisierten Mischbetrieb unter Miteinbeziehung zusätzlicher DUSS- und DBIS-Standorte und anderer Terminal-/Depotarten;
- Koordinierung des Pilotbetriebs für einen reibungslosen organisatorischen Ablauf auf dem DBIS Container-Depot und dem DUSS Container-Terminal mit Dokumentation notwendiger Prozessanpassungen für eine störungsfreie Automatisierung der Transporte;
- Durchführung einer detaillierten Analyse der im Projekt erhobenen transportrelevanten Daten und Bewertung der Ergebnisse aus der Pilotphase hinsichtlich Auswirkungen auf logistische Prozessabläufe mit Fokus auf die Schnittstellen der intermodalen Transportkette;
- Koordination der Erstellung des finalen Berichts als Koordinator der DB-Einheiten DUSS und DBIS. Die Inhalte der Praxispartner werden zusammen mit diesen entwickelt und für den finalen Bericht aufgearbeitet;
- Übernahme aller übergeordneten Projektmanagement Tätigkeiten für die involvierten DB-Einheiten; dementsprechend Leitung des internen und externen Projektmanagements für den Mutterkonzern und die beiden DB AG Tochtergesellschaften DUSS und DBIS. Im gesamten ANITA Konsortium vertritt die Deutsche Bahn somit den Konzern mit den involvierten Geschäftsfeldern DB Netze und DB Cargo;
- Wahrnehmung und Koordination von Veranstaltungen, Kongressen und Messen im Namen des DB-Konsortiums.

AlbrechtConsult GmbH (Zentrale Projektanlaufstelle)

- Unterstützung des Konsortialführers MAN bei der operativen Umsetzung des Konsortialprojektmanagements;
- Sicherstellung einer effiziente Mittelverwendung und Entlastung der Konsortialprojektleitung von administrativen Tätigkeiten;
- Organisatorische Vor- und Nachbereitung von Meetings (Regelmeetings und Steuerkreise);
- Unterstützung bei Veranstaltungen;
- Erstellung von Arbeitsmitteln: projektspezifische, einheitliche Dokumentenvorlagen für alle Bereiche.

5.1.2 Zentrale Dokumentenablage

Alle projektrelevanten Unterlagen, Dokumente und Ressourcen (Logos, Bildmaterial, etc.) standen den Projektpartnern auf dem SharePoint der DB AG zur Verfügung (siehe Abbildung 61). Die Projektpartner bzw. deren operative und koordinierenden Mitarbeiter erhielten im Rahmen eines Rechtemanagements Zugriff auf diese Ressourcen, dieses wurde durch die DB AG gewährleistet.

U. a. waren dort folgende Unterlagen verfügbar:

- Kontaktliste aller Ansprechpartner im Projekt,
- Projekthandbuch mit allen Infos zu Projektinhalten, -struktur und -durchführung sowie der Projektplan,
- Sitzungsprotokolle,
- Komplettes Berichtswesen,
- Presseunterlagen,
- Administrative Dokumente (Vorhabensbeschreibung, Verträge, Förderbescheid).

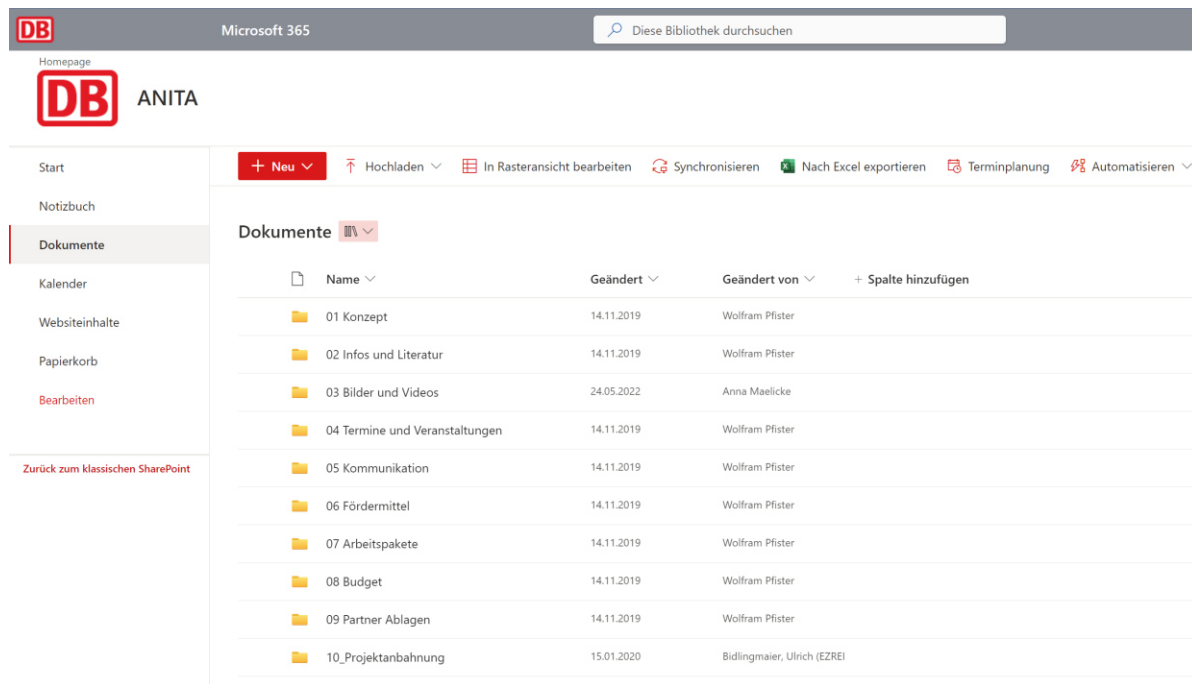


Abbildung 61: ANITA SharePoint.

5.1.3 Gremien

Steuerkreis

Der Steuerkreis stellte das Entscheidungsgremium dar, das die strategische Zielerreichung sicherstellte. Der Steuerkreis kam in der Projektlaufzeit zwei Mal zusammen, im September 2021 und November 2022. Der Projektträger (TÜV Rheinland Consulting GmbH) wurde ebenfalls zu den Steuerkreissitzungen eingeladen und sich so persönlich vom Projektfortschritt überzeugen bzw. den Projektpartnern nützliche Hinweise zur Zielerreichung geben.

Regelmeeting

Die Projektleiter trafen sich monatlich zur fortlaufenden Evaluation des Projektes auf Gesamtprojektebene. In diesen als Telefonkonferenzen stattfindenden – Regelmeetings wurden u. a. der aktuelle Projektstatus, nächste Schritte und Maßnahmen bei bestehenden Risiken oder Abweichungen besprochen. MAN bereitete als Projektkoordinator die Arbeitssitzungen in Zusammenarbeit mit dem externen Projektbüro AlbrechtConsult vor. AlbrechtConsult versendete die Einladungen, moderierte die Arbeitssitzungen und war für die Erstellung sowie den Versand der Sitzungsprotokolle verantwortlich. Zum Ende der Projektlaufzeit gab es wöchentliche Abgleichtreffen, um kurzfristige Absprachen während der Pilotphase treffen zu können.

Kommunikationsmeeting

In den Kommunikationsmeetings wurden alle Aktivitäten im Bereich der Öffentlichkeitsarbeit von den Partnern abgestimmt. Hierzu gehörten u. a. die Veranstaltung einer Halbzeitpräsentation sowie eine Abschlussveranstaltung. Darüber hinaus wurden öffentlichkeitswirksame Termine wie ein Pressetermin in den DUSS / DBIS Niederlassungen koordiniert sowie Beiträge für Websites und Social-Media-Kanäle der Partner erstellt, im Konsortium abgestimmt und veröffentlicht.

Die Einladung zu den i. d. R. monatlich sowie bei Bedarf stattfindenden Kommunikationsmeetings wurde von der DB AG koordiniert.

6 Projektkommunikation und Öffentlichkeitsarbeit (Deutsche Bahn AG)

6.1 Projekt-interne Kommunikation

Zur bestmöglichen Koordinierung der Öffentlichkeitsarbeit und der Kommunikation aus dem Projekt heraus, hatten alle beteiligten Konsortialpartner eine gesonderte Arbeitsgruppe zur Kommunikation verabredet. Im Rahmen eines 14-tägigen Jour-Fixe wurden Kommunikationsmaßnahmen besprochen, Zwischenberichte inhaltlich koordiniert und hins. Veranstaltungs- sowie Publikationsanfragen gemeinsam entschieden. Auch die Betreuung der ANITA-Webseite sowie die Koordination der ANITA-bezogenen Social-Media Aktivitäten wurde über den Arbeitskreis gesteuert. Vor großen Kommunikationsereignissen des Konsortiums (bspw. Halbzeitpräsentation und Abschlusspräsentation) wurden die Planungen dieser Veranstaltungen über diese Arbeitsgruppe durchgeführt, welche sich zu diesem Zweck unregelmäßig auch in kleinerer Frequenz traf.

Die Arbeitsgruppe zur Kommunikation hatte während der gesamten Projektdauer bestand und hat sich als sehr tauglicher Modus Operandi zur Planung und Steuerung von Kommunikationsaktivitäten für große Konsortien in einem medial stark beobachteten Themenfeld erwiesen.

6.2 Kommunikation von (Zwischen-) Ergebnissen im Rahmen von Vorträgen und Präsentationen

Neben den verfügbaren und öffentlich zugänglichen Projektberichten wurden die Zwischenergebnisse und zusammenfassende Erkenntnisse durch Mitglieder des Konsortiums bereits in zahlreichen Veranstaltungen präsentiert. Neben zahlreichen Austauschterminen mit verschiedensten Akteuren in der Logistikbranche und der Technologieentwicklung für autonome Anwendungen, fanden Projektvorstellungen (inkl. (Zwischen-) Ergebnissen) u. a. auf folgenden Veranstaltungen statt (siehe Tabelle 4:):

Tabelle 4: Auswahl von Veranstaltungen

Datum	Veranstaltungsname
Sep. 2020	Zukunftskongress Logistik im Rahmen der 38. Dortmunder Gespräche
Apr. 2021	Cluster Talk DB Systel
Sep. 2021	VDI Wissensforum Linz, Österreich
Mai 2022	Mobility & Logistics Kongress im HOLM, Frankfurt

Datum	Veranstaltungsname
Sep. 2022	Innocam Themenforum in Duisburg
Apr. 2023	Logistik Cluster Schwaben
Mai 2023	Transport Logistics in München
Juni 2023	VDI Nutzfahrzeuge
Okt. 2023	Future Transportation Logistics XChange im HOLM, Frankfurt
Nov. 2023	Connected Automated Transport Summit (CAT) in Delft, NL

7 Fazit der Projektpartner

7.1 Nachbereitung / Retrospektive

Nach dem planmäßigen Projektabschluss am 30.09.2023 plante das Projektkonsortium einen gemeinsamen Termin zur Retrospektive. MAN sprach dafür die Einladung ins Stammwerk nach München am 24.10.2023 aus.

Alle Partner waren bei dem Workshop, der auch als hybrides Meeting angeboten wurde, vertreten. Die Moderation ermöglichte einen angeregten Austausch zu fünf Fragen:

- 1) Was hat gut funktioniert?
- 2) Was hat nicht gut funktioniert?
- 3) Was war der Schlüssel zum Projekterfolg?
- 4) Was hat mich überrascht?
- 5) Was wollen wir [das nächste Mal] besser machen?

Die Fragen wurden nacheinander behandelt. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer erhielten große Haftnotizen, auf denen sie ihre wichtigsten Punkte notieren konnten, die in einer anschließenden Diskussionsrunde besprochen wurden. Dabei stellte jeder Teilnehmende die eigenen Standpunkte vor und bekam Feedback von den anderen Partnern.

Diese Form der Retrospektive wurde von den Anwesenden als nützlich und produktiv empfunden.

Was hat gut funktioniert?

In diesem Bereich gab es große Übereinstimmung unter den Partnern: Die positive Form der Zusammenarbeit, gegenseitiges Vertrauen und Wertschätzung, die Teamfähigkeit und vor allem die Flexibilität bei den Logistikpartnern vor Ort haben alle Teilnehmenden besonders hervorgehoben. Die Zusammenarbeit war vertrauensvoll und fand stets auf Augenhöhe statt. Durch die positive Grundeinstellung zueinander konnte mit Problemen im Projektverlauf konstruktiv umgegangen werden. Auch der zum Projektmanagement gehörende Teil der Meetings (vor allem das Regelmeeting und der Steuerkreis) gehörte aus Sicht der Partner zu den Projekthaltungen, die gut funktionierten.

Die stattgefundenen Events im Projekt sowie deren Planung (Presse-Event, Zwischenpräsentation, Abschlussveranstaltung) wurden ebenso von allen Partnern lobend hervorgehoben.

Was hat nicht gut funktioniert?

Defizite im Projektverlauf sahen die Partner in diesen Bereichen:

Technische Gesichtspunkte

Die wesentliche Herausforderung im Projekt entstand durch die enorme Verzögerung von etwa einem Jahr gegenüber dem Projektplan, mit der der Versuchsträger von MAN fertiggestellt wurde. Die Gründe dafür waren vor allem gestörte Lieferketten und dadurch beeinträchtigte Abläufe vor Ort (z. B. durch Kurzarbeit), insbesondere verursacht durch die Coronapandemie und später durch den Beginn des Ukrainekriegs. Alle Partner waren sich einig, dass diese Probleme nicht durch MAN verschuldet wurden. Aus Sicht der Partner wäre ein offenerer Umgang mit den Verzögerungen wünschenswert gewesen.

Projektplanung / Projektmanagement

Besonders das Erwartungsmanagement („Was genau soll ein automatisierter LKW im Logistikprozess können?“) auf allen Seiten wurde in diesem Bereich hervorgehoben, auch war der Projektplan nicht an allen Stellen detailliert genug. Zusätzlich war die Projektdokumentation teilweise lückenhaft, weil Entscheidungen nicht immer dokumentiert wurden. Dieses Thema führte vor allem bei Wechseln von Ansprechpartnern zu einer aufwändigeren Einarbeitung.

Die Projektdokumentation sowie die Erreichung von Meilensteinen hätte ausführlicher geschehen sollen, sodass auch rechtzeitig Maßnahmen zur Mitigation von Projektrisiken hätten ergriffen werden können, wenn auch nicht jedes Risiko dadurch beherrschbar werden konnte.

Zusammenarbeit allgemein / Kommunikation / Testing

Der Versuchsträgeraufbau hatte ein Jahr Verzug. In ANITA wurden gänzlich neue Technologien entwickelt, die ein gewisses technologisches Risiko darstellen. Dies hat, zusammen mit den oben genannten Gründen, zu massiven Verzögerungen bei den Tests und der Pilotphase geführt. Außer dem Verzug waren aus Sicht der Logistikpartner Kritikpunkte, dass Testtage tw. zu kurzfristig angekündigt bzw. abgesagt wurden. Das operative Personal in Terminal und Depot hätte noch stärker einbezogen werden sollen.

Was war der Schlüssel zum Projekterfolg?

Vor allem die gute Zusammenarbeit, die positive Stimmung im Projekt, die Flexibilität bei den Logistikpartnern und die passende Mischung aus Mindset und Skills bei den Beteiligten haben das Projekt ANITA zu einem erfolgreichen Abschluss gebracht. Dabei wurde auch herausgehoben, dass besonders die Praxisnähe, insbesondere durch die Testfahrten im gemischten Verkehr des Tagesbetriebs und der perspektivische Nutzen der Automatisierung für die Logistikbranche das Projekt einzigartig machten und einen Mehrwert für alle Projektpartner darstellt. Es hat die Herausforderungen und die Bedürfnisse aller Partner

gezeigt und ein gemeinsames Verständnis für die Entwicklung von automatisierten Fahrzeugen und deren Umgebung erzeugt

Was hat mich überrascht?

Bei diesem Punkt bezogen sich die Reaktionen der Partner vor allem auf die Flexibilität aller Beteiligten, die Geschwindigkeit, mit der verzögerte AP zum Schluss noch aufgeholt werden konnten.

Was wollen wir [das nächste Mal] besser machen?

Auch hier gab es größere Themengebiete, zu denen Verbesserungsvorschläge gemacht wurden:

Projektplanung

Eine möglichst detaillierte Zielplanung aller Partner, inklusive Benennung von unverzichtbaren, hoch priorisierten und weniger wichtigen Komponenten, sowie die deutliche Darstellung von Abhängigkeiten zwischen den APs schafft von Anfang an Klarheit. So können z. B. bei Verzögerungen die Auswirkungen auf andere Partner früher erkannt und Konsequenzen daraus gezogen werden. Bei der Personalplanung sollte etwas mehr Spielraum für zusätzliche Ressourcen geschaffen werden, um entwicklungsintensive Phasen besser im Griff zu haben. Die Erwartungen aller Projektpartner sollten noch klarer formuliert und festgehalten und im Projektverlauf aktiv miteinander abgeglichen werden. Schon im Laufe des Projektes sollte an mögliche Folgeprojekte und eine praktische Anwendung der erzielten Ergebnisse im gemeinsamen Kontext gedacht werden.

Projektmanagement / Dokumentation

Die Pflege und Weiterentwicklung des Kommunikationsplans und der Rollenbeschreibungen, die Dokumentation der Projektergebnisse, Änderungen im Projekt und die Nachverfolgung von Meilensteinen sowie Konsequenzen bei Nicht-Erreichung / Abbruchkriterien sollten stärker im Fokus stehen. Dabei kann auch eine unabhängige, von allen Partnern beauftragte Projektsteuerung helfen. Ein technischer Projektleiter, der unterhalb der Konsortial-Projektleitung angesiedelt ist, könnte die gemeinsamen Anstrengungen orchestrieren und koordinieren.

Zusammenarbeit

Vor allem die Verbesserung der fachlichen Kommunikation stand ganz oben auf der Liste: So könnte ein gemeinsames Entwicklungsboard die technische Zusammenarbeit fördern und stärken, da die Teams direkt und ohne Reibungsverluste miteinander in Kontakt stehen. Technische Regelmeetings können tragen ebenfalls zu einem engeren Austausch beitragen. Zuständigkeiten sollten klarer abgesprochen und festgehalten werden, das betrifft

insbesondere das Projektende, wo der Austausch noch intensiviert werden sollte. Mehr Transparenz und „Deep Dives“ tragen zur Kommunikation auf Augenhöhe bei.

7.2 Take Home Message

Im Rahmen des Pilotprojekts ANITA zur Erprobung autonomer Lastkraftwagen (LKW) für Terminalumfuhren im DUSS-Terminal Ulm sowie dem DBIS-Depot in Ulm wurden zentrale Erkenntnisse für zukünftige Projekte und die zukünftige Implementierung dieser Technologie zusammengetragen. Die Untersuchung offenbarte, dass die Integration hochautomatisierter mobiler Systeme in existierende IT-Landschaften eine Vielzahl an Wechselwirkungen berücksichtigen muss. Nachfolgend die wichtigsten Erkenntnissen des Projektes:

- Die Einbindung eines automatisierten LKW in die Logistik Prozesse und Infrastruktur muss die gewachsenen Strukturen sowie die vertikalen und horizontalen Vernetzungen berücksichtigen, damit Automatisierungspotentiale nicht theoretisch bleiben, sondern umgesetzt werden können.
- Um eine reibungslose Einführung und Integration des autonomen LKWs in bestehende Betriebsabläufe zu gewährleisten ist die Beteiligung und das Engagement des Personals vor Ort ein zentraler Erfolgsfaktor.
- Der Einsatz autonomer LKW hat signifikante Effizienzsteigerungen ermöglicht, insbesondere durch die Reduzierung von Durchlaufzeiten bei Terminalumfuhren unter variierenden Betriebsbedingungen, was zu einer stabilisierten Prozessführung führte. Diese Effizienzgewinne dienen als deutlicher Beleg für die potenziellen Vorteile, die eine breitere Einführung autonomer LKW für das Terminalmanagement und logistische Prozesse bieten könnte. Zusätzlich ermöglicht der Einsatz solcher Fahrzeuge eine flexiblere Disposition während Lastspitzen und trägt somit zur Glättung betrieblicher Spitzenbelastungen bei.
- Die Systemfitness (Performanz, Resilienz, Flexibilität etc.) kann signifikant durch die digitale Verknüpfung von Fahrzeug und Infrastruktur verbessert werden. Ein wesentlicher Teil der Digitalisierung besteht in der Umstellung der Kommunikation von asymmetrisch zu symmetrisch, d.h. es erfolgt eine reziproke Prüfung von Prozessen vor deren Ablauf, was erheblich zur Prozesssicherheit beiträgt.
- Die Planung von Prozessen und der effiziente Einsatz von Ressourcen profitiert von Terminalsimulationen und schafft kurz-, mittel- und langfristige Handlungssicherheit. Dies ist auch ein wesentlicher Nachhaltigkeitsaspekt.
- Die Implementierung dieser Technologie als Teil eines Gesamtsystems erfordert jedoch eine besondere Berücksichtigung der Kommunikationsprozesse und -schnittstellen, welche eine kritische Rolle spielen. Die Kommunikation zwischen dem autonomen LKW und den Steuerungssystemen des Terminals gestaltete sich als

besonders herausfordernd. Kommunikationsabbrüche oder -fehler führten oft zum Abbruch von Einsätzen, was die Notwendigkeit einer stabilen und zuverlässigen Kommunikationsinfrastruktur hervorhebt.

- Bei der Entwicklung von autonomen oder hybrid-autonomen Systemen muss die direkte Nutzung für die Domain und die Gesellschaft im Blick behalten werden. Die Sinnhaftigkeit kann transnational oder ggf. auch transregional variieren. Unabhängig davon, reicht die Umsetzung eines autonomen Fahrprozesses allein für viele Geltungsbereiche nicht aus, um sozioökonomisch sinnvoll zu sein. Vielmehr müssen im Logistikbereich der gesamte Transport- und Umschlagprozess – der durch viele Informationsübergaben und physische Aktionen gekennzeichnet ist - beherrscht werden. Eine wesentliche Rolle spielen dabei abgestimmte Interaktionen sowohl zwischen Mensch und Maschine aber auch zwischen verschiedenen Maschinen, bspw. LKW und Kran.
- Eine Automatisierung von ausgedehnten Terminalbereichen basiert auf der Kooperation von verschiedenen Maschinen. Damit diese Kooperation funktionieren kann bedarf es einer gemeinsamen „Sprache“, was hier als gemeinsamer Daten- und Schnittstellen-Standard zu verstehen ist. Dieser Standard kann nicht von einem Akteur vorgegeben werden, sondern sollte sich aus einer Vorwärtsbeteiligung verschiedener Akteure und Akteursgruppen (Fahrzeughersteller, Terminalbetreiber, Logistiker, Software-/TOS-Hersteller, Kranhersteller etc.) herauskristallisieren. Wir schlagen hier die Deontic Reasoning Methode als Erweiterung einer White- und Blacklist vor.
- Während man kybernetische Systeme – auch große und komplizierte – gut über eine zentrale Intelligenz steuern kann, greift diese Strategie meist nicht gut in komplexen Systemen, welches jedoch hier vorhanden ist. Folglich sollte man in Zukunft auf verteilte Intelligenzen zurückgreifen bzw. das System so aufbauen. Dies ist insbesondere für ein flexibles Systemagieren notwendig. Trotz verteilter Intelligenzen braucht es eine gemeinsame Datenbasis, ein „Single Source of Truth“.

7.3 Zusammenfassung

Das Projekt ANITA konnte trotz großer Herausforderungen durch den Druck, der auf der Logistikbranche liegt, sowie durch die weltpolitische Lage sehr gut zum Abschluss gebracht werden. Der automatisierte LKW konnte insgesamt 40 Tage im Echtbetrieb unter realen Bedingungen im Terminal und Depot von DUSS und DBIS fahren. Dies ist ein einzigartiges Ergebnis für ein Forschungsprojekt. Die Integration eines autonomen Fahrzeuges im Terminalablauf hat das Verständnis für die Herausforderungen und die Bedürfnisse der verschiedenen Projektpartner geschärft. Gemeinsam haben wir gezeigt, dass diese Integration möglich ist, eine maßgeschneiderte Lösung, die in der Zukunft weiterentwickelt werden muss. Bis jetzt gibt es keinen Standard für die Kommunikation von autonomen LKW

mit der Infrastruktur eines Hubs, jedes Logistikunternehmen hat ein eigenes System. Um die Integration von autonomen LKW voranzutreiben, müssen alle Beteiligte am Logistikprozess daran arbeiten, einen Standard zu setzen

Vor allem die Praxisnähe und die intensive Pilotphase im Echtbetrieb haben Akzente mit bleibendem Eindruck, sowohl bei den Projektpartnern als auch bei der Fach- und Tagespresse und politischen Entscheidungsträgern, hinterlassen. Die Möglichkeiten von Folgeanwendungen, beispielsweise auch im Hub-to-Hub-Verkehr oder bei vollautomatisierten Umfuhren zwischen Terminal und Depot, sind immens und werden von der Logistikbranche mit Interesse betrachtet. Mögliche Ausbaustufen wären auch die Ergänzung der Fahrzeugsensorik durch Infrastrukturkomponenten, um das Gelände und den begleitenden Verkehr noch besser erfassen zu können, sowie eine Weiterentwicklung der Vertragssprache im Kommunikationssystem, um z. B. komplexere Regeln und Fahraufträge noch detaillierter abbilden zu können.

Literaturverzeichnis

- Angeloudis, P., & Bell, M. G. H. (2011) A review of container terminal simulation models, *Maritime Policy & Management*, 38(5), 523-540
- Applin, S. A., & Fischer, M. D. (2013). Thing theory: Connecting humans to location-aware smart environments. *LAMDa'13*, 29.
- Arnold, R. D., & Wade, J. P. (2015). A definition of systems thinking: A systems approach. *Procedia computer science*, 44, 669-678.
- Bartoli N, Revetria B, Morra E, Galli G, Williams E, Schenone M. (2020). The Multi Crane Scheduling Problem: A Comparison Between Genetic Algorithm and Neural Network Approaches based on Simulation Modeling. *ICDS 2020: The Fourteenth International Conference on Digital Society*.
- BGHW Spezial (2017) Betrieb von fahrerlosen Flurförderfahrzeugen – Personenschutz durch Erkennungssysteme,
https://kompendium.bghw.de/bghw/xhtml/document.jsf?docId=bghw_sp/bghw_sp-Documents/b12sp04/b12sp04_0_.html.
- Briskorn D. (2021). Routing two stacking cranes with predetermined container sequences. *Journal of Scheduling* 24: 367–380.
- Carlo, H.J., Vis, I.F.A., & Roodbergen, K.J. (2014) Transport operations in container terminals: Literature overview, trends, research directions and classification scheme. *European Journal of Operational Research* 236, 1, 1-13.
- Dragović, B., Tzannatos, E. & Park, N.K. (2017) Simulation modelling in ports and container terminals: literature overview and analysis by research field, application area and tool. *Flex Serv Manuf J* 29, 4–34.
- Gambardella, L.M., Rizzoli, A.E., & Zaffalon, M. (1998) Simulation and Planning of an Intermodal Container Terminal. *Simulation*, 71(2), 107-116.
- Gerrits, B., Mes, M., & Schuur, P. (2018) A simulation model for the planning and control of AGVs at automated container terminals Winter Simulation Conference (WSC Gothenburg, Sweden), 2941-2952,
- Hur, S. H., Lee, C., Roh, H. S., Park, S., & Choi, Y. (2020). Design and simulation of a new intermodal automated container transport system (ACTS) considering different operation scenarios of container terminals. *Journal*
- Huynh, N., & Hutson, N. (2008). Mining the sources of delay for dray trucks at container terminals. *Transportation Research Record*, 2066(1), 41-49.
- Inninger, W., Schellert, M., & Schulz, H. (2018). Analyse der Randbedingungen und Voraussetzungen für einen automatisierten Betrieb von Nutzfahrzeugen im innerbetrieblichen Verkehr. *FAT-Schriftenreihe*, (312).

- Kezić, D., Vujović, I., & Gudelj, A. (2007) Petri Net Approach of Collision Prevention Supervisor Design in Port Transport System. *Promet-Traffic and Transportation*, 19 (5), 269-275.
- Kondratowicz, L.J. (1990) Simulation methodology for intermodal freight transportation terminals. *Simulation*, 55(1), 49-59.
- Kovács, G., & Spens, K. M. (2005). Abductive reasoning in logistics research. *International journal of physical distribution & logistics management*, 35(2), 132-144.
- Lau, M. (2023) Untersuchung der Performanz von Containerterminals bei der Einführung von automatisierten Fahrzeugen, Masterthesis, unveröffentlicht
- Li, B., Tan, K.W., & Tran, T.K. (2016) Traffic Simulation Model for Port Planning and Congestion Prevention. *Winter Simulation Conference*, Washington, DC, December 11-14: Proceedings. 2382-2393.
- Luhmann, N., & Luhmann, N. (1981). Die Unwahrscheinlichkeit der Kommunikation. *0Soziologische Aufklärung 3: Soziales System, Gesellschaft, Organisation*, 25-34.
- Makarova, I., Shubenkova, K., Mavrin, V., Mukhametdinov, E., Boyko, A., Almetova, Z., & Shepelev, V. (2020). Features of logistic terminal complexes functioning in the transition to the circular economy and digitalization. *Modelling of the interaction of the different vehicles and various transport modes*, 415-527.
- Maurer, M., Gerdes, J. C., Lenz, B., & Winner, H. (2016). Autonomous driving: technical, legal and social aspects. *Springer Nature. of Marine Science and Engineering*, 8(4), 233.
- Ng, S.H., Ong, R., & Zhou, C. (2022). Traffic Strategy for Mixed Traffic in Container Terminals. In: Guo, H., Ren, H., Wang, V., Chekole, E.G., & Lakshmanan, U. (Hrsg.) *IRC-SET 2021*. Springer, Singapore.
- PwC (2016). Digitized Trucking: Betriebskosten eines LKWs lassen sich bis 2025 um 15 Prozent senken, <https://www.pwc.de/de/transport-und-logistik/digitized-trucking-betriebskosten-eines-lkws-lassen-sich-bis-2025-um-15-prozent-senken.html>.
- Reimer, R., Noack, T., Scheier, B., & Meyer zu Hörste, M. (2011). Abschlussbericht: Neue Technologieansätze für automatisierbare Terminals im kombinierten Verkehr (TaT), Teilvorhaben: Hochpräzise, verlässliche Ortung von Kranen und mobilen Einheiten.
- SAE International (30.04.2021). Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles (SAE J 3016).
- SAE International (31. Mai 2019). Automated Driving System (ADS) Marker Lamp (SAE J 3134).
- Soyez, J. B., Morvan, G., Merzouki, R., & Dupont, D. (2014, December). A multilevel agent-based approach to model and simulate systems of systems. In *InTraDE project final workshop*.

Tioga Group. (2011). Truck Drayage Productivity Guide (No. 11). Transportation Research Board.

Treiber, M., & Kesting, A. (2010). Verkehrsdynamik und -simulation. Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik. Springer: Heidelberg, Dordrecht, London, New York.

VDI (2020) Fahrerlose Transportsysteme (FTS) – Leitfaden Sicherheit, https://forum-fts.com/images/stories/downloads/Leitfaden_FTS-Sicherheit_VDI_20200101.pdf.

Vis, I.F.A. (2006) Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems. European Journal of Operational Research, 170 (3), 677-709.

Wahlster, W. (2017). Künstliche Intelligenz als Grundlage autonomer Systeme. Informatik-Spektrum, 40(5), 409-418.

Weerasinghe, B. A., Perera, H. N. & Bai, X. (2023) Optimizing container terminal operations: a systematic review of operations research applications. Marit Econ Logist.

Weick, K. E., Sutcliffe, K. M., & Obstfeld, D. (2005). Organizing and the process of sensemaking. Organization science, 16(4), 409-421.

Yang, C.H., Choi, Y. S., & Ha, T. Y. (2004) Simulation-based performance evaluation of transport vehicles at automated container terminals. OR Spectrum 26: 149–170.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Projekt ANITA: Gemeinsamer Schlussbericht	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Jacquemart-Purson, Amélie (MAN Truck and Bus SE) Haas, Christian T., Prof. Dr. (Hochschule Fresenius) Schöder, Dustin, Dr. (Deutsche Bahn AG) Kluge, Nils (Götting KG) Gebauer, Oliver (MAN Truck and Bus SE) Harsandi, Veronika (MAN Truck and Bus SE) Jürgens, Stefan (MAN Truck and Bus SE) Kutenreich, Fabian (MAN Truck and Bus SE) Lippert, Lars (MAN Truck and Bus SE) Strauss, Peter (MAN Truck and Bus SE) Troberg, Sonja (MAN Truck and Bus SE) Wölfel, Christiane (MAN Truck and Bus SE) Wulf, Leonie (MAN Truck and Bus SE) Schubert, Patric, Dr. (Hochschule Fresenius) Lau, Marius (Hochschule Fresenius) Fritz, Michael (Hochschule Fresenius) Gemmerich, Anne-Marie (Hochschule Fresenius) Wunsch, Thomas (Deutsche Umschlaggesellschaft Schiene-Straße) Präse, Jens (DB Intermodal Services) Thomsen, Mikkel (Deon Digital) Bugge, Bjørn (Grathwohl, PhD Deon Digital) Lüpkes, Iris (AlbrechtConsult GmbH)	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2023 6. Veröffentlichungsdatum 28.06.2024 7. Form der Publikation digital
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) MAN Truck & Bus SE, Dachauerstrasse 667, 80995 München Hochschule Fresenius, Limburger Straße 2, 65510 Idstein DB Intermodal Services GmbH, Rheinstraße 2, 55116 Mainz Götting KG, Celler Str. 5, 31275 Lehrte – Röddensen DUSS GmbH, Am Kümmerling 24, 55294 Bodenheim Deutsche Bahn AG, Gallusanlage 8, 60329 Frankfurt am Main	9. Ber. Nr. Durchführende Institution 10. Förderkennzeichen 19A20006 11. Seitenzahl 133
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 35 Angaben 14. Tabellen 4 Tabellen 15. Abbildungen 61 Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) TIB, Hannover, 28.06.2024	

18. Kurzfassung

Das Projekt ANITA (Autonome Innovation im Terminalablauf) war eine Kooperation zwischen der MAN Truck & Bus SE, der Deutschen Bahn AG, der Hochschule Fresenius und Götting KG. Das Ziel war einen autonomen LKW im Logistikprozess von der DB Intermodal Services (DBIS) und von Deutsche Umschlaggesellschaft Schiene-Straße mbH (DUSS) in Ulm zu integrieren. Das Projekt startete Mitte 2020 und endete im September 2023. Es handelt sich hier um den gemeinschaftlichen Projekt-Abschlussbericht.

Die Ziele von ANITA waren vielfältig:

- Integration eines autonomen LKWs im Terminalprozess unter realen Bedingungen: das autonome Fahrzeug sollte Missionen übernehmen, um Container zwischen dem Container-Depot von DB Intermodal Services und dem DUSS-Terminal in Ulm-Dornstadt zu überführen. Die Messfahrten und Pilotphase des Projekts wurden unter normalen Betriebsbedingungen durchgeführt.
- Entwicklung eines autonomen LKWs für die Anforderungen des ANITA-Projekts: Das Gelände von DBIS und DUSS stellte einige Herausforderungen für ein autonomes Fahrzeug dar. Im Laufe des Projekts sind Lösungen dafür entwickelt worden.
- Entwicklung eines Kommunikationssystems um den LKW, das Depot und das Terminal miteinander zu verbinden. Dieses Kommunikationssystem sollte sicherstellen, dass die für die Mission notwendigen Nachrichten bei allen Beteiligten des Logistikprozesses ankommt.
- Analyse der Systemperformance und der möglichen Erweiterung auf andere Terminals.
- Automatisierung des Ab-/Aufsattels mit einem automatisierten Fahrzeug.

19. Schlagwörter

ANITA, Autonomer LKW, Missionsplanung, Hub-to-Hub Verkehr

20. Verlag

21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report		
3. title Project ANITA: Consortium Final Report			
4. author(s) (family name, first name(s)) Jacquemart-Purson, Amélie (MAN Truck and Bus SE) Haas, Christian T., Prof. Dr. (Hochschule Fresenius) Schöder, Dustin, Dr. (Deutsche Bahn AG) Kluge, Nils (Götting KG) Gebauer, Oliver (MAN Truck and Bus SE) Harsandi, Veronika (MAN Truck and Bus SE) Jürgens, Stefan (MAN Truck and Bus SE) Kuttenreich, Fabian (MAN Truck and Bus SE) Lippert, Lars (MAN Truck and Bus SE) Strauss, Peter (MAN Truck and Bus SE) Troberg, Sonja (MAN Truck and Bus SE) Wölfel, Christiane (MAN Truck and Bus SE) Wulf, Leonie (MAN Truck and Bus SE) Schubert, Patric, Dr. (Hochschule Fresenius) Lau, Marius (Hochschule Fresenius) Fritz, Michael (Hochschule Fresenius) Gemmerich, Anne-Marie (Hochschule Fresenius) Wünsch, Thomas (Deutsche Umschlaggesellschaft Schiene-Straße) Pröse, Jens (DB Intermodal Services) Thomsen, Mikkel (Deon Digital) Bugge, Bjørn (Grathwohl, PhD Deon Digital) Lüpges, Iris (AlbrechtConsult GmbH)		5. end of project 30.09.2023	6. publication date 28.06.2024
		7. form of publication digital	
8. performing organization(s) (name, address) MAN Truck & Bus SE, Dachauerstrasse 667, 80995 München Hochschule Fresenius, Limburger Straße 2, 65510 Idstein DB Intermodal Services GmbH, Rheinstraße 2, 55116 Mainz Götting KG, Celler Str. 5, 31275 Lehrte – Rödensen DUSS GmbH, Am Kümmerling 24, 55294 Bodenheim Deutsche Bahn AG, Gallusanlage 8, 60329 Frankfurt am Main		9. originator's report no.	10. reference no. 19A20006
		11. no. of pages 133	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn		13. no. of references 35 references	14. no. of tables 4 tables
		15. no. of figures 61 figures	
16. supplementary notes			
17. presented at (title, place, date) TIB, Hannover			

18. abstract

The ANITA project (Autonome Innovation im Terminalablauf) was a cooperation between MAN Truck & Bus SE, Deutsche Bahn AG, Fresenius University of Applied Sciences and Götting KG. The goal was to integrate an autonomous truck into the logistics process of DB Intermodal Services (DBIS) and Deutsche Umschlaggesellschaft Schiene-Straße mbH (DUSS) in Ulm. The project started in mid-2020 and ended in September 2023. This is the consortium final project report.

The main goals of ANITA were:

- Integration of an autonomous truck in the terminal process under real conditions: the autonomous vehicle was to take over missions to transfer containers between the container depot of DB Intermodal Services and the DUSS terminal in Ulm-Dornstadt. The test runs and pilot phase of the project were carried out under normal operating conditions.
- Development of an autonomous truck for the requirements of the ANITA project: The DBIS and DUSS site presented some challenges for an autonomous vehicle. Solutions for this have been developed in the course of the project.
- Development of a communication system to connect the truck, the depot and the terminal. This communication system was intended to ensure that the messages necessary for the mission reach all those involved in the logistics process.
- Analysis of system performance and possible expansion to other terminals.
- Automation of uncoupling/uncoupling with an automated vehicle.

19. keywords

ANITA, autonomous truck, mission planning, hub-to-hub transport

20. publisher

21. price