
Verbundprojekt ANITA – Autonome Innovation im Terminalablauf

Automatisiertes Fahren von LKW im realen Logistikbetrieb



Partnerspezifischer Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:

MAN Truck and Bus SE
Dachauer Str. 667
80995 München

Förderkennzeichen:

19A20006 A

Vorhabenbezeichnung:

Autonome Innovation im Terminalablauf
ANITA

Laufzeit des Vorhabens:

01.07.2020 bis 30.09.2023

Dokumenteninformation

Autoren¹

Name	Organisation
Gebauer, Oliver	MAN Truck and Bus SE
Harsandi, Veronika	MAN Truck and Bus SE
Jacquemart-Purson, Amélie	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
Rother, Liesa	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

¹ Zur besseren Lesbarkeit wird in diesem Bericht das generische Maskulinum verwendet. Die verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich – sofern nicht anders kenntlich gemacht – auf alle Geschlechter.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
1 Projektüberblick und Einführung in den Bericht	12
1.1 Aufgabenstellung	12
1.2 Voraussetzungen	12
1.2.1 Industriepolitische Ausgangslage	12
1.2.2 Allgemeine Herausforderungen	13
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	14
1.3.1 Projektstruktur	14
1.3.2 Arbeitspakete und Verantwortlichkeiten	15
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn	16
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	19
2 Systemanalyse und Regelwerkentwicklung (AP 1)	21
3 Fahrzeugentwicklung (AP 2)	23
3.1 Konzeption von Fahrzeug und Software (AP 2.1)	23
3.1.1 Konzeption der Fahrzeugarchitektur (AP 2.1.1)	23
3.1.2 Konzeption der Softwarearchitektur (AP 2.1.2)	25
3.2 Fahrzeugaufbau (AP 2.2)	26
3.2.1 Integration (AP 2.2.1)	26
3.2.2 Komponententest (AP 2.2.2)	29
3.3 Funktionsentwicklung (AP 2.3)	30
3.3.1 Sensorik und Perzeption (AP 2.3.1)	30
3.3.2 Bewegungsplaner (AP 2.3.2)	48
3.3.3 Motion Control (AP 2.3.3)	53
3.3.4 Mensch-Maschine-Schnittstelle (AP 2.3.4)	63
3.3.5 V2X-Kommunikation (AP 2.3.5)	74
3.3.6 Lokalisierung des Sattelauflegers (AP 2.4)	75
3.3.7 Hinderniserkennung zur Kollisionsvermeidung (AP 2.5)	75
4 Entwicklung eines digitalen Kommunikationssystems (AP 3)	76
5 Durchführung der Testfahrten (AP 4)	77
5.1 Erprobung und Optimierung des Fahrzeugs (AP 4.1)	77
5.2 Testphase (AP 4.2) und Pilotbetrieb (AP 4.3)	78

5.3	Auswertung und Ausblick (AP 4.4)	80
5.4	Lessons Learned	82
6	Validierung der Regelwerke (AP 5)	85
7	Systemsimulation und Transformation (AP 6)	86
8	Projektmanagement (AP 7)	87
8.1	Konsortialprojektmanagement	87
8.2	Partnerinternes Projektmanagement	88
8.3	Lessons Learned	89
9	Zielerreichung: Anpassungen und nachträgliche Betrachtung	91
10	Zahlenmäßiger Nachweis: wichtigste Positionen	93
11	Schlusswort	94
	Literaturverzeichnis	95

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektstruktur ANITA. _____	15
Abbildung 2: Netzplan Arbeitspakete ANITA. _____	15
Abbildung 3: Auszug der Präsentation der Vorabanalyse. _____	21
Abbildung 4: Anwendungsfall des autonomen LKW bei DUSS. _____	22
Abbildung 5: Automatisierungssystem im Innenraum des Fahrzeugs. _____	26
Abbildung 6: Chassis und Container bei einer Messfahrt im DUSS-Terminal. _____	27
Abbildung 7: Funktionale Module des automatisieren Systems. _____	30
Abbildung 8: Visualisierung der Simulation. Links: Normale Ansicht. Rechts: Zugehörige Simulation von Lidaren. _____	31
Abbildung 9: Oben und Unten: Visualisierung der Punktwolken aus den Lidaren zwei verschiedener Hersteller. Unten: Zugehörigen Kameradaten der links dargestellten Punktwolken. _____	32
Abbildung 10: Links: Bilder der Topview Kameras. Rechts: Zum Vergleich die Visualisierung der Lokalisierung. _____	33
Abbildung 11: Links: Prototyp des Corner-Moduls am Versuchsträger. Rechts: CAD-Modell. _____	34
Abbildung 12: Zeitliche Synchronisierung der verbauten Lidarsensoren. Farbcodiert ist die Zeitdifferenz. _____	35
Abbildung 13: Visualisierung der Punktwolke. _____	35
Abbildung 14: Links: Simulierte Punktwolken von Lidar-Sensoren mit eingeblendeter physischer Umgebung. Rechts: Ohne eingeblendeter physischer Umgebung. _____	36
Abbildung 15: Links: Der mit Markern bestückte Versuchsträger. Rechts: Die daraus erzeugte dreidimensionale Punktwolke. _____	37
Abbildung 16: Oben: Unkalibriertes Lidar-System am Versuchsträger. Unten: Kalibriertes Lidar-System. _____	38
Abbildung 17: Links und Mitte: Reflektoren verschiedener Hersteller. Rechts: Test eines Reflektors in der Kalibrierhalle. _____	39
Abbildung 18: Referenzmessung des MAN Versuchshofs und der Lidardaten (bunt dargestellt). _____	40
Abbildung 19: Anwendung der Nachkalibrierung. MAN Versuchshofs und der Lidardaten (bunt dargestellt). _____	40

Abbildung 20: Links: Messfahrzeug im DBIS-Depot Ulm. Rechts: MAN-Teststrecke in München. _____	41
Abbildung 21: Karte des DBIS-Depots. _____	41
Abbildung 22: Graphenbasierte Lokalisierung. Karte (blau); zur Karte zugeordnete Landmarken (grün); Landmarkenmessungen (grau, orange und rot). ____	42
Abbildung 23: Links: Bild einer am Versuchsträger verbauten Kamera. Rechts: Punktwolke der Lidare. _____	43
Abbildung 24: Fusionierte Lidarpunktwolke mit herausgefiltertem Egofahrzeug und überlagerten Farbinformationen. _____	44
Abbildung 25: Visualisierung der hochgenauen Zuordnung von Lidar- und Kameradaten. Links: Der Rolling-Shutter-Effekt führt zu Fehlern bei der Zuordnung. Rechts: Rolling-Shutter-Effekt wird kompensiert. _____	45
Abbildung 26: Verbesserungen der semantischen Segmentierung. Jeweils Links: Originalbild. Rechts oben: alter Stand. Rechts unten: neuer Stand. _____	46
Abbildung 27: Visualisierung der fusionierten SPS-Punktwolke. Links: farbkodierte Geschwindigkeit. Rechts: semantische Segmentierung. _____	46
Abbildung 28: Links: Semantische Segmentierung des ursprünglichen Netzes. Rechts: Output nach dem Training. _____	47
Abbildung 29: Anspruchsvoller Manöver-Pfad zum Einparken des autonomen Trucks in einen Fischgrätenparkplatz des DBIS-Depot. Links: Repräsentative Darstellung auf Satellitenbild. Rechts: Visualisierung des sensorbasierten Umgebungsmodells und der geplanten Trajektorie. _____	50
Abbildung 30: Visualisierung von Prädiktionen anderer Verkehrsteilnehmer hinter dem Ego-Fahrzeug in komplexem Terminalverkehr. Oben: Korrekte Adaption der Prädiktion an Ego-Fahrzeug. Unten: Fehlende Adaption der Prädiktion an Ego-Fahrzeug führt zu Kollisionsdetektion. _____	51
Abbildung 31: Visualisierung einer generierten Trajektorie zum automatischen Aufsatteln inklusive eines Status-Screens zur manuellen Prozessüberwachung. ____	53
Abbildung 32: Funktionskomponenten (rot) im Gesamtsystemkontext. _____	54
Abbildung 33: Fahrzeugschnittstelle: Allokation der Fahrzeugschnittstelle auf Fahrzeug-Steuergerät (Electronic Control Unit – ECU) und CAN-Anbindung. _____	56
Abbildung 34: Fahrzeugschnittstelle: Funktionale Sicht auf Vehicle Control und Mode Management. _____	56
Abbildung 35: Geschwindigkeit und Zeitverlauf Regelfehler, Strecke: DUSS-Einfahrt nach Ausfahrt, am 22.09.2023. _____	58

Abbildung 36: Statistik der Regelfehler. Strecke: DUSS-Einfahrt nach Ausfahrt, am 22.09.2023.	59
Abbildung 37: Schematische Darstellung der Eingangs- und Ausgangsgrößen der Eigenbewegungsschätzung.	60
Abbildung 38: Phasen des Vorgangs zum automatisierten Auf- und Absatteln.	61
Abbildung 39: Links: Bereiche zur Positionierung der Leuchtelemente. Rechts: Aufbau des externen HMI-Konzepts.	64
Abbildung 40: Links: LED Leuchtstreifen im Sonnenlicht. Mitte: Kennleuchte für den industriellen Einsatz. Rechts: Handelsübliche Blitzleuchte.	65
Abbildung 41: LED-Streifen am Türgriff der Fahrertür.	66
Abbildung 42: Links: Cyan lackierte Blitzleuchten. Rechts: Doppelt verbaute Blitzleuchten in grün und cyan.	66
Abbildung 43: Links: 3D-Druck Adapter Front. Mitte: Einbauposition Frontklappe. Rechts: Einbaupositionen Seite.	67
Abbildung 44: Externes HMI-Konzept Gesamtübersicht.	67
Abbildung 45: Links: 3D-Druck Adapter mit LED-Streifen am Türgriff. Mitte und Rechts: Türgriff leuchtet in grün oder rot.	67
Abbildung 46: Schematische Darstellung des State-Chart des externen HMI-Detailkonzepts.	68
Abbildung 47: Tischaufbau zum Testen des externen HMI-Konzepts.	69
Abbildung 48: Schematische Darstellung des State-Chart für die Anzeigen im Kombi-Display für den Sicherheitsfahrer.	70
Abbildung 49: Links: Anzeige „Automation an“ im Cluster. Rechts: Anzeige „Automation aus“.	71
Abbildung 50: 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.	71
Abbildung 51: Links: Warnhinweis auf Schildern und Schulungsunterlagen. Rechts: Warnhinweis zur Anbringung am Fahrzeug.	72
Abbildung 52: Schnittstellendesign (DDS, Message Queuing Telemetry Transport – MQTT).	75
Abbildung 53: Mittlere Umlaufzeiten (Median) für Umfuhren klassischer LKW und autonomer LKW.	81
Abbildung 54: Demostart bei der Abschlusspräsentation.	87

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Verantwortlichkeiten in den AP _____	16
Tabelle 2:	Funktionale Sicherheitsziele für die Fahrzeugschnittstelle _____	57
Tabelle 3:	Funktionale Sicherheitsziele für die Funktion AFW _____	60
Tabelle 4:	Funktionale Sicherheitsziele für die Funktion ATL _____	62

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Abstandsregeltempomat (Adaptive Cruise Control)
ADAS	Fahrerassistenzsysteme (Advanced Driver Assistance System)
ADMA	Automotive Dynamic Motion Analyzer
ADS	Automatisiertes Fahrsystem (Automated Driving System)
AFW	Automatische Sattelkupplung (Auto-Fifth-Wheel)
AGX	Autonomous GPU Acceleration
ANITA	Autonome Innovation im Terminalablauf
AP	Arbeitspaket
ATL	Auto-Twistlocks
BGHW	Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik
CAD	Computer Aided Design
CAN	Controller Area Network
CI/CD	Continuous Integration / Continuous Delivery
CPU	Hauptprozessor (Central Processing Unit)
DB AG	Deutsche Bahn AG
DBIS	Deutsche Bahn Intermodal Services
DDS	Data Distribution Service
DUSS	Deutsche Umschlaggesellschaft Schiene-Straße mbH
E-Box	Elektronische Versorgungsbox
ECU	Steuergerät (Electronic Control Unit)
FFFO	Fail Fast Fail Often
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
FTF	Fahrerlose Transportfahrzeuge
FTS	Fahrerlose Transportsysteme
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem (Global Navigation Satellite System)
GPS	Globales Positionsbestimmungssystem (Global Positioning System)
GPU	Grafikprozessoreinheit (Graphics Processing Unit)
h	Stunde
HAD	Highly Automated Driving
HD	High Definition
HMI	Mensch-Maschine-Schnittstelle (Human Machine Interface)
HOLM	House of Logistics an Mobility
HS	Hochschule
Hz	Hertz
ICP	Iterative Closest Point

IMU	Inertiale Messeinheit (Inertial Measurement Unit)
ISO	International Organization for Standardization
KKS	Komfort-Kupplungs-System
km	Kilometer
KPI	Key Performance Indicator
KVM	Keyboard Video Mouse
LED	Light Emitting Diode
LTE	Long Term Evolution
m	Meter
MAN	MAN Truck & Bus SE
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
ms	Millisekunde
ODD	Operational Design Domain
PMD	Photomischdetektoren
PTP	Precision Time Protocol
RCP	Rapid Control Prototyping
RQ	Forschungsfrage (Research Question)
s	Sekunde
SAE	Society of Automotive Engineers
SAFe	Scaled Agile Framework
SPS	Super-Positions-Sensor
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
t	Tonnen
TC	Trajektorienfolgeregelung (Trajectory Tracking Control)
TCO	Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership)
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TOS	Terminal-Operation-System
UDP	User Datagram Protocol
V	Volt
V2X	Vehicle-to-Everything
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

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 Logistikumsfelds 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 inkl. 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 Querschnittfunktion 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 größeren 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 diesen Anwendungsfall in den Fokus genommen. Es wurde auf zwei abgegrenzten Bereichen – einem Terminal für kombinierten Verkehr und einem Containerdepot – das Potenzial von automatisiert fahrenden Sattelaufliegern getestet. Die Fahrt auf der öffentlichen Straße zwischen den beiden Betriebsgeländen wurde aufgrund von deutlich weitergehenden Regularien bei autonomen Fahrten im öffentlichen Verkehrsraum, manuell durchgeführt. Die Terminal- und Depotbereiche sind weitgehend geschützt und 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. Eine technisch ausgereifte Umsetzung kann jedoch einen bedeutenden Wettbewerbsvorteil für die deutsche Industrie darstellen, insbesondere im Hinblick auf die Anpassungsfähigkeit an internationale Konkurrenten.

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)

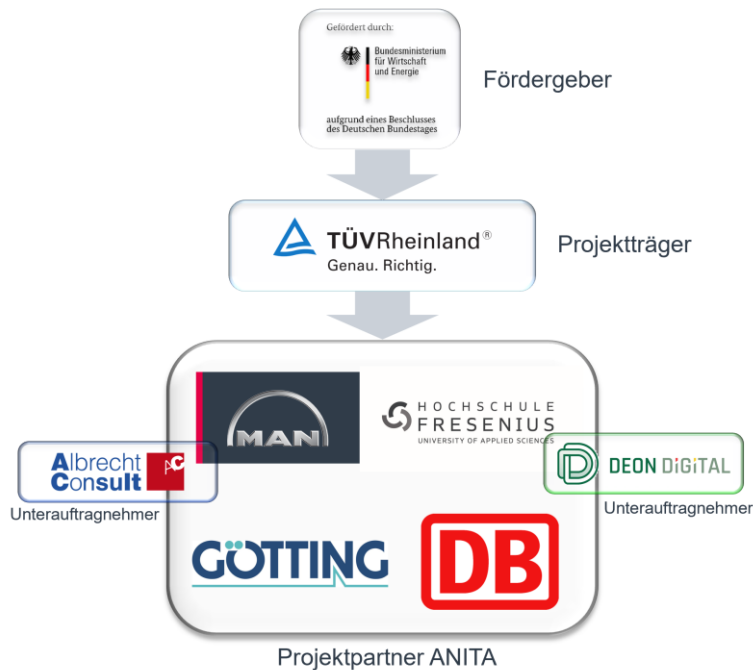


Abbildung 1: Projektstruktur ANITA.

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) abgebildet, aufeinander auf. Die Verantwortlichkeiten waren festgelegt, wie in Tabelle 1 dargestellt.

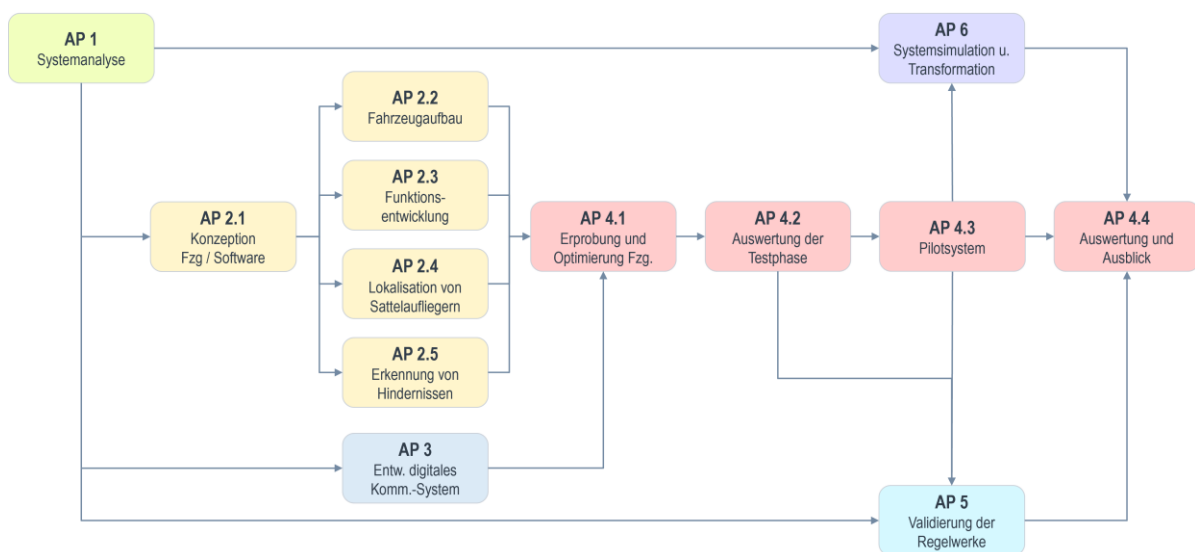


Abbildung 2: Netzplan Arbeitspakete ANITA.

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 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 legen die spezifischen sicherheitstechnischen Anforderungen für fahrerlose Flurförderzeuge fest, um einen sicheren Betrieb in verschiedenen Arbeitsumgebungen zu gewährleisten (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 performante 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 Systemanalyse und Regelwerkentwicklung (AP 1)

Sicherheit und Nutzbarkeit stellen zentrale Aspekte der Fahrzeugentwicklung dar. Daher wurden zu Beginn des Projekts Werksanalysen durchgeführt, um die für die Funktionsentwicklung und die Mensch-Maschine-Schnittstelle entscheidenden Gegebenheiten und Interaktionen auf dem Gelände der DBIS und DUSS in Ulm-Dornstadt herauszufinden.

Im ersten Schritt sichteten die Mitarbeiter der MAN Örtlichkeiten und fixierten schriftlich die Abläufe bzw. Regeln in einer Art Dokumentenanalyse. Eine erste Voranalyse vor Ort fand am 25.08.2020 gemeinsam mit der Hochschule Fresenius statt. Ziel dieser Voranalyse war es, sich einen ersten persönlichen Eindruck über die örtlichen Gegebenheiten zu verschaffen und die, anhand der Dokumentensichtung, geplanten Analysemethoden entsprechend anzupassen. Beim Termin vor Ort stellten die Mitarbeiter von DBIS und DUSS die Abläufe und das Gelände grob vor. Zudem erfolgten erste Mitfahrten in den LKW der internen DBIS Umfuhren, wobei erste Foto- und Videoaufnahmen gemacht wurden. Die nachfolgende Abbildung 3 zeigt eine Folie aus der Präsentation der Vorabanalyse.

> Einzelbetrachtungen

DBIS Depot: Einfahrt

- ⊗ Fahrmanöver
- ⊗ Interaktion
- ⊗ Aussteigen/Arbeiten außerhalb des Fahrzeugs
- ✔ Verkehrsteilnehmer
 - Andere einfahrende und ausfahrende Fahrzeuge
 - 2 Parkflächen für ausfahrende Lkw (auf falscher Seite)
- ✔ Verkehrsregeln & Straßenbeschaffenheit
 - Höchstgeschwindigkeit von 25 km/h
 - Geteert, Spurmarkierungen und Randsteine vorhanden
- ⊗ Möglicher Übergabe-/Übernahmeplatz für Lkw



Abbildung 3: Auszug der Präsentation der Vorabanalyse.

Auf Basis der gewonnenen Daten und Eindrücke, wurden in den darauffolgenden Wochen Beobachtungsprotokolle für umfangreiche Mitfahrten bei internen DBIS und DUSS Umfuhren erstellt, welche das Ziel hatten, auf jedem Streckenabschnitt für die Fahrfunktion die relevanten Gegebenheiten vor Ort aufzuzeichnen. Des Weiteren wurden Interviewleitfäden für die Mitarbeiter der Büros (DBIS und DUSS), die Container-Checker (DBIS und DUSS), interne LKW-Fahrer (DBIS und DUSS), einen Kranführer (DUSS) und einen Fahrer eines Reachstackers (DBIS), sowie für die Standortleiter (DBIS und DUSS) erstellt, um die genauen Abläufe im Alltag und kritische Bereiche zu identifizieren.

3 Fahrzeugentwicklung (AP 2)

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 Kühlauslegung Vorhalte für Steuergeräte-Muster eingeplant.

Die Fahrzeugentwicklung erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Partner Götting². Die von Götting entwickelten Funktionen greifen auf die Sensordaten der MAN-Systeme zurück und sind in einem virtualisiertem 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.

Nach Analyse der Komponenten-Datenblätter wurden im Projekt außerdem detaillierte Schaltpläne für folgende Komponenten erstellt:

- Automotive Dynamic Motion Analyzer (ADMA)
- Autonomous GPU Acceleration (AGX)
- Aufliegerschnittstelle
- Radarsystem
- CAN-Topologie (17 CANs)
- CAN-Gateways für unidirektionale CAN-Verbindung, die das Grundfahrzeug gegen Störeinflüsse schützen sollen
- CAN-Abgriffsmöglichkeit für Messungen und Fehlersuche
- Spannungsversorgung für 12 V-Komponenten
- Spannungsversorgung für 24 V-Komponenten

² <https://www.goetting.de/>

- Bidirektionaler Spannungswandler (230 V ↔ 24 V)
- CAN-Datenlogger
- Lidarscanner
- Kameras
- Microautobox
- Lidare
- Spiegelersatzkameras
- Drehraten- und Beschleunigungssensor
- Komfort-Kupplungs-System (KKS)

Ziel dieses Arbeitspakets 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 nachfolgende Abbildung 5 zeigt das eingerüstete Automatisierungssystem in der LKW-Fahrerkabine.



Abbildung 5: Automatisierungssystem im Innenraum des Fahrzeugs.

Der Anwendungsfall im Projekt 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 6 zeigt ein Chassis samt Container bei einer Messfahrt im DUSS-Terminal mit einem Vorläufer des späteren Versuchsträger, der im Rahmen von ANITA für Entwicklungsarbeiten genutzt wurde.



Abbildung 6: Chassis und Container bei einer Messfahrt im DUSS-Terminal.

Folgende mechanische Arbeiten wurden am Fahrzeug durchgeführt:

- Konzeption Corner Modul: CAD-Modell Entwicklung und Fertigung.
- Sensorhalter Lidare: Konzeption, Herstellung der Halter und Integration in das Fahrzeug.
- Sensorhalter ADMA: Konzeption, Herstellung der Halter und Integration in Fahrzeug.
- Systemträger: Konzeption, Aufbau und Integration ins Fahrzeug.
- Wasserkühlung: Konzeption und Integration ins Fahrzeug.
- Externe Monitore: Integration der externer Monitore für Entwickler.
- KKS: Integration des Systems in Zugmaschine und Trailer.
- Anbringung der Corner-Module am Fahrzeug.
- Ausnahmegenehmigung § 70 StVZO-Freigabe der Corner-Module.
- Optimierung der Sensorposition des Heck-Lidar-Sensors.
- Konzeption und Montage der Außen-Mensch-Maschine-Schnittstelle (Human Machine Interface – HMI).
- Einbau eines Monitors für die Rückfahrkamera.
- Einbau des Götting-PC.
- Corner-Module: Ersetzen der Corner-Module, da die ursprünglichen das Sichtfeld der integrierten Kameras verdeckt haben.
- KKS: Reparatur eines Schadens, der während der Erstinbetriebnahme entstanden ist.

- KKS: Tausch der Sattelkupplung – Installation einer Variante mit Rückfahrkamera.
- Zweifacher Tausch der PC-Wasserkühlung durch verschiedene Fehler am Pumpen- und Radiatorsystem.
- Mehrfache Analyse der PC-Systeme bzgl. Temperaturproblematik (CPU und Grafikkarten begrenzen ihre Leistung durch zu hohe Temperaturen).
- Austausch der Grafikkarten-Kühler zur Temperaturreduktion.
- Umbau der Zu- und Abläufe der Wasserkühlung von parallel auf seriell (Optimierung der Wärmeabfuhr der PC-Systeme).
- Einbau und Inbetriebnahme. Precision-Time-Protocol-(PTP-)Switch
- Einbau und Inbetriebnahme PTP-Grandmaster.
- Einrüstung LTE-Router für Internet-Anbindung der Deon³-Schnittstelle.
- Einrüstung HMI-Blitzleuchten.
- Einrüstung HMI-LED-Streifen.
- Einbau HMI-Kombiinstrument / Cluster.
- Reparatur eines Schadens an einem der Lidar-Sensoren.
- Reparatur eines Schadens an der Seitenklappe des Versuchs-LKW.
- Einrüstung weiterer Lüfter zur Kühlung des verbauten PC-Gesamtsystems.
- Einbau eines Strommessaufbaus für die ARS540 Radare.
- Austausch des PTP-Ethernet-Switches sowie Einrüstung eines zweiten Ethernet-Switches.

Folgende elektrische Arbeiten wurden am Fahrzeug durchgeführt:

- Elektrische Grundversorgung vollständig integriert:
 - Aufbau der sogenannten elektronischen Versorgungsbox (E-Box) für 24 V und 12 V (Spannungsverteilung für alle Automatisierungskomponenten).
 - Bidirektionaler Spannungswandler als Ladegerät und für 230 V Versorgung im Fahrzeug.
- Messtechnik: Integration von Strom- und Spannungsmesstechnik, Integration eines CAN-Datenloggers, Konfiguration des CAN-Datenloggers.
- CAN-Topologie: Konzeption und Integration.
- Steuergeräte / Rechner: Integration.
- KKS: Integration in Fahrzeug und Trailer, Vorbereitung für Automation.

³ <https://www.deondigital.com/>

- Elektrische Anbindung der Corner-Module.
- Kamera-Inbetriebnahme der Corner-Module über die AGX.
- Einbau einer Umschaltmöglichkeit zwischen Serien Infotainment-Monitor und Entwickler-PC-Visualisierung.
- Elektronische Tests des Außen-HMI im Labor.
- Inbetriebnahme eines Monitors für die Rückfahrkamera.
- Tests mit einem prototypischen Steuergerät.
- Umstellung von Windows 7-Systemen auf Windows 10.
- Inbetriebnahme des Götting-PC.
- Optimierung der E-Box-Software für einen fehlerfreien Initialisierungsprozess der elektronischen Hardware.
- Einbau eines geregelten 24 V Gleichstrom-Wandlers für den ausfallfreien Betrieb der Wasserkühlung der PC-Systeme.
- Fehlerbehebung bei den elektronischen Zuleitungen der Keyboard-Video-Mouse-(KVM-)Switches.
- Initiale Sensorkalibrierung (nach der Prager Methode).
- Fehlersuche Datenverlust des Heck-Lidars.
- PC-System:
 - Ausbau aus Fahrzeug und Aufbau im Labor zur Analyse einer auftretenden Temperaturproblematik.
 - Durchführung eines Stresstests von Grafikeinheit (Graphics Processing Unit – GPU) und CPU im Labor.
 - Adaption der Kühlkörper von Grafikkarten und CPU.
 - Auftragen von Wärmeleitpaste.
 - Analyse des Wasserkreislaufs.
 - Wiedereinbau der Rechner in das Fahrzeug.
 - Stresstest von GPU und CPU im Fahrzeug.
 - Kommunikation mit dem Lieferanten.

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, HMI und Vehicle-to-Everything-(V2X-)Kommunikation, die auch in Abbildung 7 dargestellt ist, ermöglichte eine Parallelisierung der Arbeiten. Auf diese Arbeitspakete wird in den folgenden Kapiteln eingegangen. Die letzten beiden Kapitel 3.3.6 und 3.3.7 betreffen die Automatisierungsbausteine, die zusammen mit Götting entwickelt wurden.

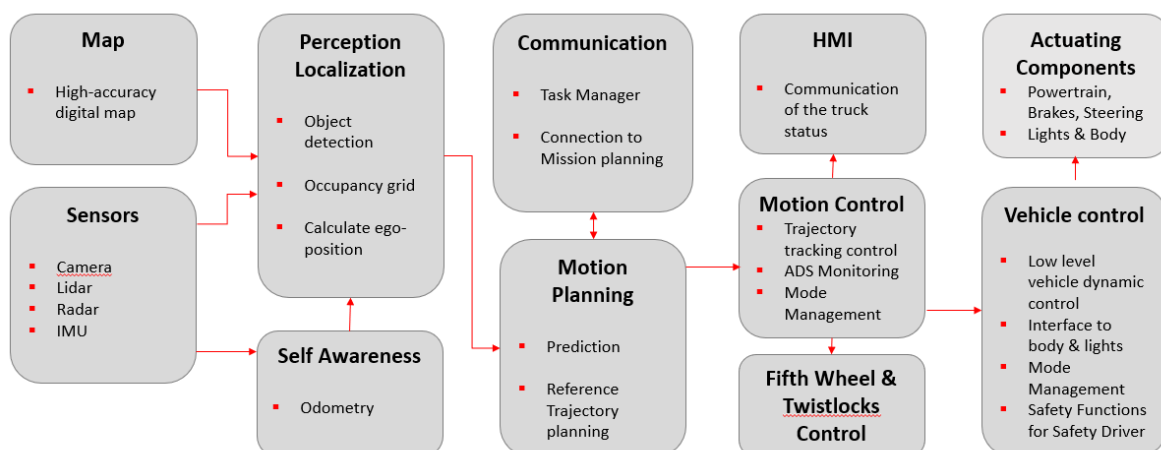


Abbildung 7: Funktionale Module des automatisierten Systems.

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 8 zeigt die Visualisierung einer solchen Simulation. Links die normale Ansicht, rechts die zugehörige Simulation von Lidaren und ihrem Erfassungsbereich.

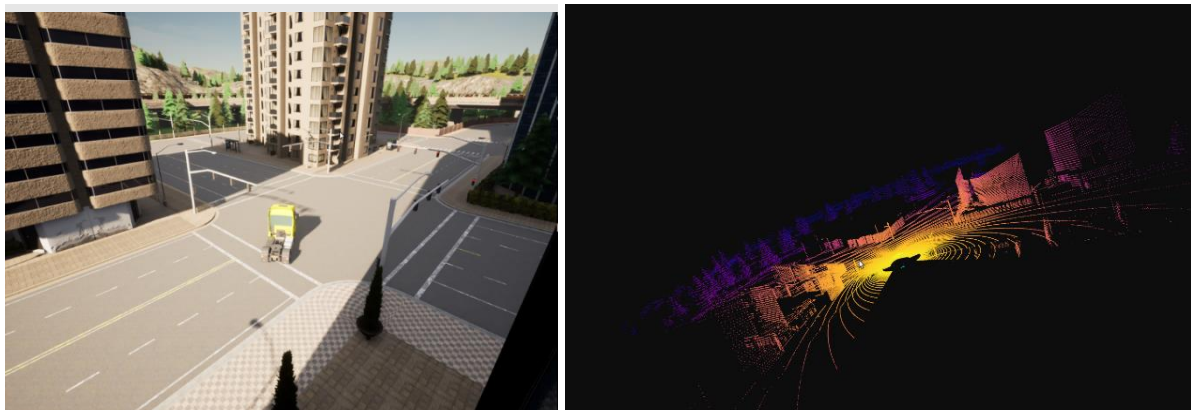


Abbildung 8: Visualisierung der Simulation. Links: Normale Ansicht. Rechts: Zugehörige Simulation von Lidaren.

Am Markt verfügbare Sensoren wurden schließlich mit den Anforderungen abgeglichen und Kandidaten identifiziert. Schließlich wurde mit verschiedenen Herstellern Kontakt aufgenommen und die Anforderungen diskutiert. Auch bereits im Serienfahrzeug vorgesehene Sensorik wurde in das ANITA-Sensorsetup integriert.

Sensorinbetriebnahme

Unter dem Begriff der Sensorinbetriebnahme werden die Schritte Erhalt der Sensoren, Anschluss an Netzwerke und Rechner, die Konfiguration der Sensoren und die Validierung der empfangenen Daten zusammengefasst. Nachfolgend wird auf besondere Herausforderungen während des Projekts zu den einzelnen Sensormodalitäten eingegangen.

Lidare

- Auf Netzwerkseite mussten anfangs Probleme beim Empfang der User Datagram Protocol-(UDP-)Daten ausgeräumt werden. Die Schwierigkeiten konnten letztlich softwareseitig gelöst werden, unter anderem durch eine Anpassung der Firmware.

- Aufwändige Synchronisation der Lidare untereinander um Cross-Talking und gegenseitige Störungen zu vermeiden. Die Lidare mussten außerdem zu den Kameras synchronisiert werden (siehe Seite 34 Zeitsynchronisation).
- Die Lidarrohdaten der Einzelsensoren wurden gebündelt und über das Netzwerk sowohl der Low-Level-Fusion als auch dem Logging zur Verfügung gestellt.
- Die Schnittstellensoftware (Decoder) wurde erweitert, sodass die korrekte Funktionsweise (Frequenz, Datenverlust, Sensorstörung, Zeitsynchronisierung) der Lidare detaillierter überwacht werden konnte.
- Visualisierung zur Validierung der Lidare zwei verschiedener Hersteller (siehe Abbildung 9).

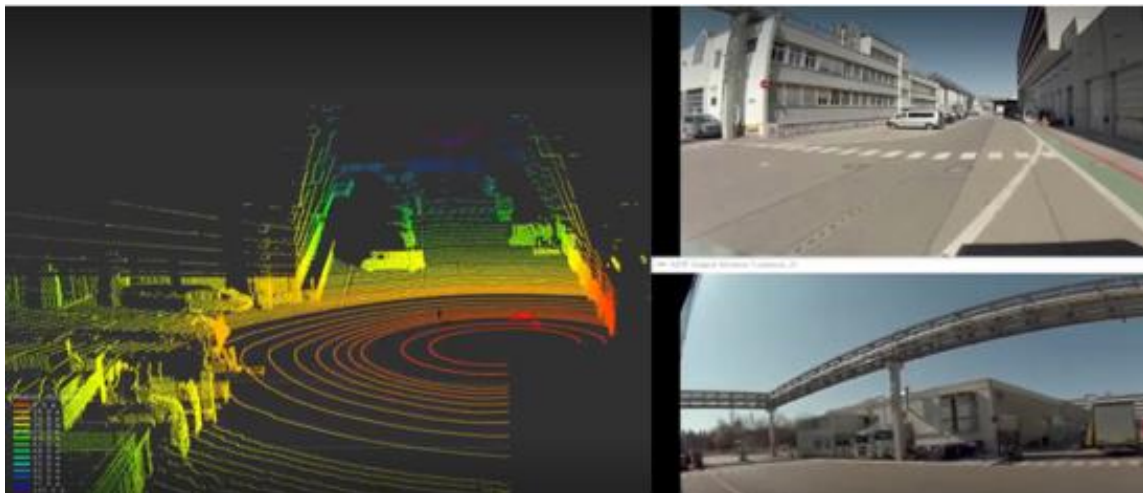
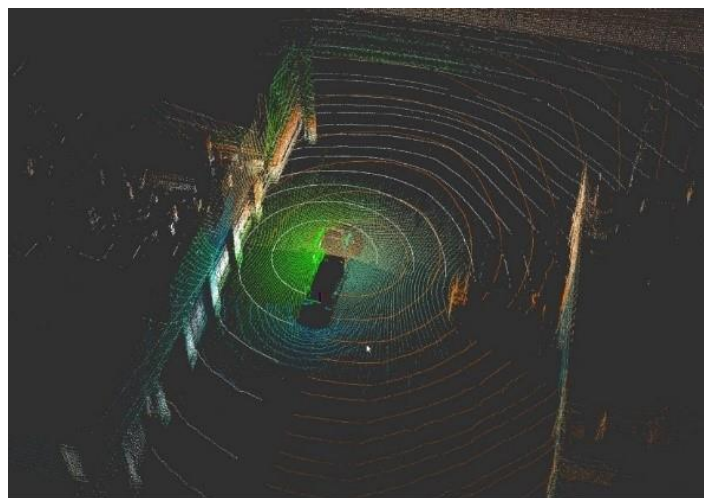


Abbildung 9: Oben und Unten: Visualisierung der Punktwolken aus den Lidaren zwei verschiedener Hersteller.
 Unten: Zugehörigen Kameradaten der links dargestellten Punktwolken.

Radare

- Bei diesen handelte es sich um Vorserienmodelle, weshalb die Firmware zusammen mit dem Hersteller für die Anbauposition parametrisiert werden musste.

- Außerdem wurden Schwierigkeiten analysiert und mit dem Hersteller diskutiert. Dies führte letztlich zum Einsatz speziell für den Einsatzzweck angepasster Firmware.

Kameras

- Die Kameras, als dritte Modalität erzeugen, verglichen mit Radar und Lidar, die höchsten Datenraten. Deshalb kamen für die Abfrage der Daten („Framegrabbing“) spezielle PCs und Einschubkarten zum Einsatz.
- Durch Komprimierungsverfahren musste die Datenmenge auf diesen PCs zunächst minimiert werden, um die Daten über die Netzwerke austauschen zu können. Unkomprimierte Datenmengen führten zu Netzwerkproblemen.
- Es kamen Kameras an zwei Positionen des Fahrzeugs zum Einsatz: an der Position der beiden Spiegelersatzkameras (MAN Seriensystem) und in den beiden Corner-Modulen (siehe Seite 34 Corner-Modul).
- Die Spiegelersatzkameras wurden für die Überwachung des direkten Umfeldes des LKW vorgesehen. Sie dienten aber z. B. auch als Ground Truth für die Überprüfung der Lokalisierung (siehe Abbildung 10).
- Die Kameras der Corner-Module wurden dagegen primär für die Fusion mit den anderen Sensoren des Corner-Moduls vorgesehen. Deshalb wurden hierfür „Trigger-Mechanismen“ implementiert, die die synchrone Aufnahme parallel zu den Kameras steuerten (siehe Seite 34 Zeitsynchronisation).
- Da hierbei auf verschiedene Kamerahardware zurückgegriffen werden musste, mussten auch die Vorverarbeitungsschritte auf unterschiedlichen Hardware- und Softwarelösungen umgesetzt werden.

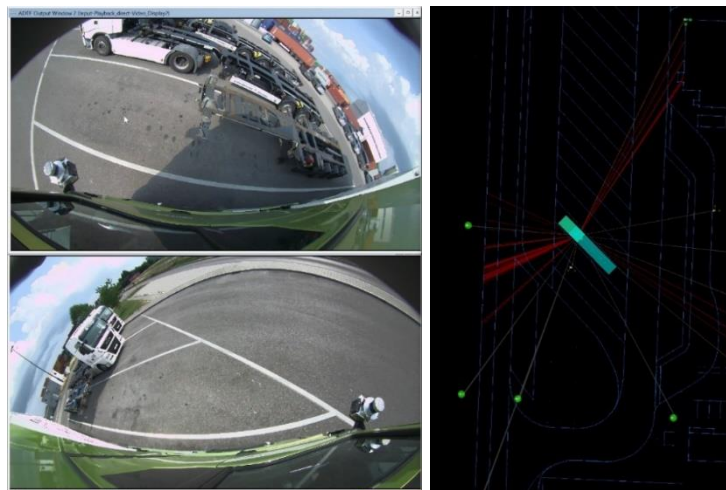


Abbildung 10: Links: Bilder der Topview Kameras. Rechts: Zum Vergleich die Visualisierung der Lokalisierung.

Corner-Modul

Mit dem Corner-Modul wurde eine spezielle Anordnung von einem Lidar, zwei Kameras und drei Radaren für die Low-Level-Sensorfusion getestet. Für diese Form der Fusion ist es besonders vorteilhaft, wenn die Sensoren ähnlich Blickwinkel haben. Die Konstruktion des Corner-Moduls ordnet diese Sensoren deshalb möglichst kompakt zueinander an. Ein Prototyp des Corner-Moduls und zugehörigem CAD-Modell ist in Abbildung 11 dargestellt. Der Begriff „Corner“ (engl. Ecke) leitet sich dabei von der Anbringung an der vorderen „Ecke“ / A-Säule des Fahrerhauses ab.

Insgesamt wurden zwei Versionen des Moduls durch MAN konstruiert und in Fertigung gegeben. Die zweite Version berücksichtigt Erkenntnisse des ersten Moduls, wie zum Beispiel steiler angewinkelte Flächen um den Ablauf von Wasser zu ermöglichen, Maßnahmen zur Erhöhung der Stabilität, Verbesserungen bei der internen Kabelführung und der Sensorsichtfelder. Das Corner-Modul ist außerdem mit einer Vorrichtung versehen, welche die Linsen der Kameras von Wasser und Staub „freiblasen“ kann.

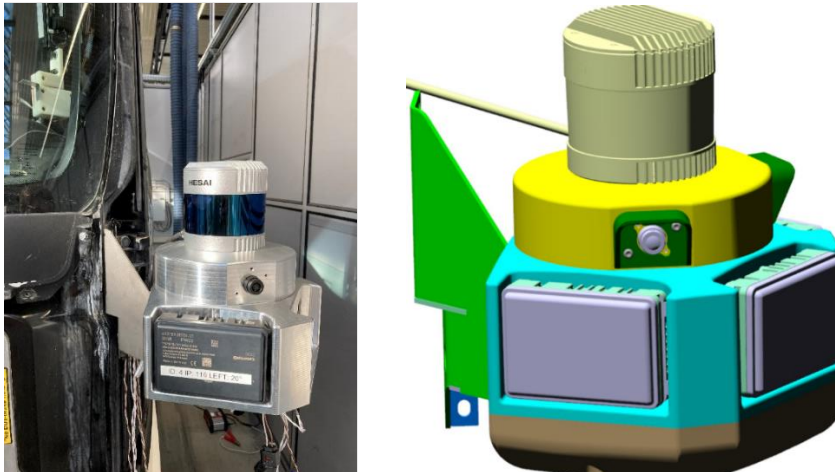


Abbildung 11: Links: Prototyp des Corner-Moduls am Versuchsträger. Rechts: CAD-Modell.

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. Für die Umsetzung mussten neben der Inbetriebnahme des PTP-Protokolls tiefere Anpassungen in der Firmware der Framegrabbingboards vorgenommen werden. Mit eingeführter Synchronisation konnte letztlich aber auch die Frequenzen der Kameras von 30 Hz auf 10 Hz reduziert werden, was zu einer Entlastung des Netzwerks beitrug. Die zeitliche Synchronisation der verbauten Lidarsensoren ist in Abbildung 12 dargestellt.

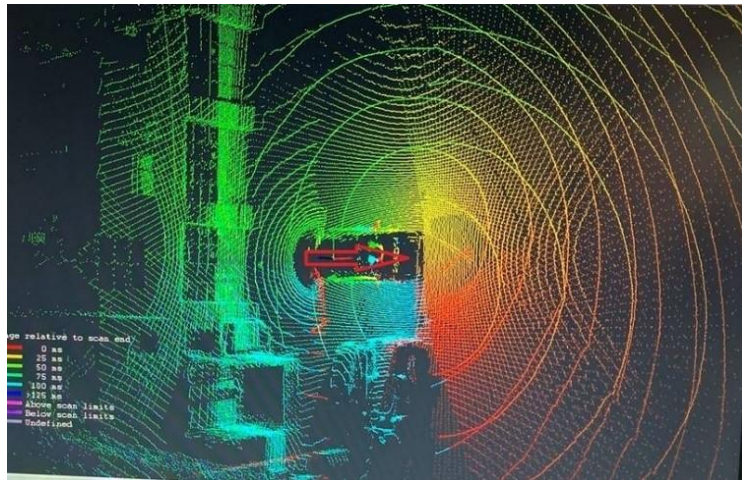


Abbildung 12: Zeitliche Synchronisierung der verbauten Lidarsensoren. Farbcodiert ist die Zeitdifferenz.

Grundlage für die Sensorfusion war ein hochgenauer Zeitgeber, der als separates Modul in das Fahrzeug eingerüstet wurde. Über das in Betrieb genommene PTP wurden 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 war.

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 13 zeigt die Visualisierung der Punktwolke, die sich aus der Simulation der im Sensorsetup vorgesehenen Lidare ergab, samt einem Hindernis.

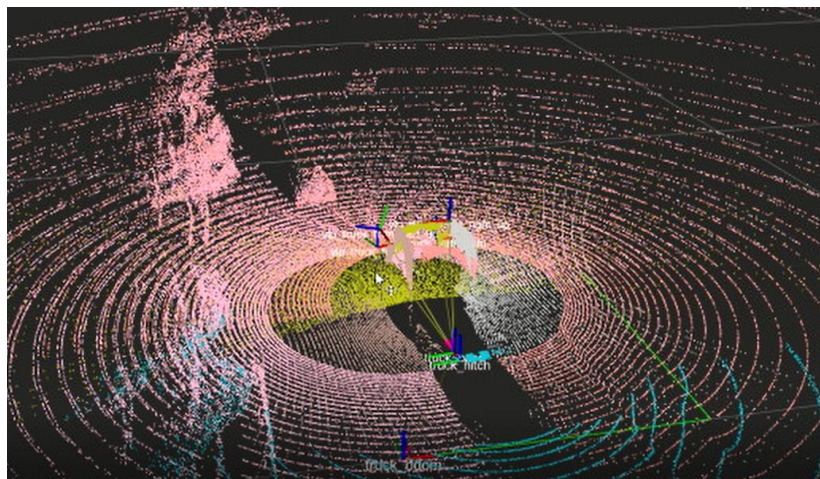


Abbildung 13: Visualisierung der Punktwolke.

Abbildung 14 zeigt die Visualisierungen einer Simulation des rückwärts gerichteten Anfahrens an einen Trailer. Dargestellt sind die simulierten Punktwolken von Lidar-Sensoren, links mit eingeblendeter Geländeumgebung, rechts ohne.

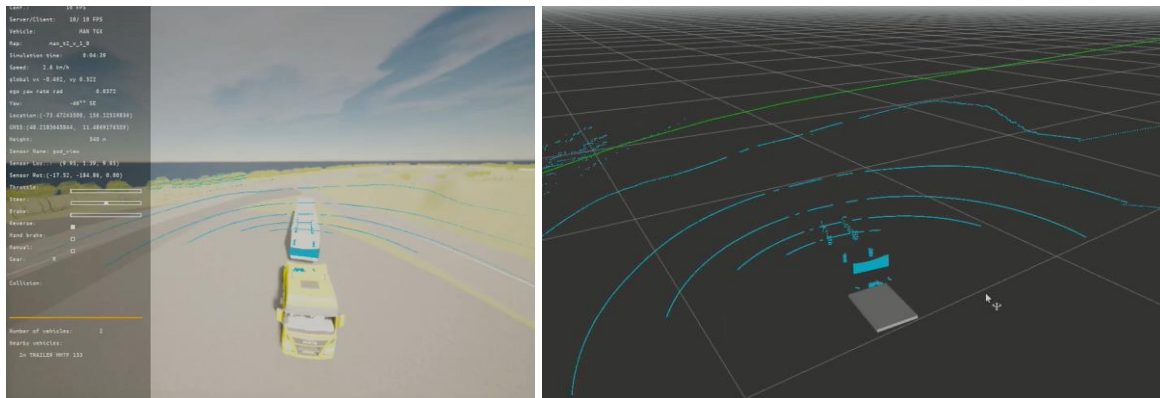


Abbildung 14: Links: Simulierte Punktwolken von Lidar-Sensoren mit eingeblendeter physischer Umgebung. Rechts: Ohne eingeblendeter physischer Umgebung.

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. Dieser sitzt an einer zentralen Stelle im System und kann als Bridge der diversen Frameworks und Data-Distribution-Service-(DDS-)Versionen im Gesamtnetz fungieren. Neben den Werten des Odometrieschätzers, des Knickwinkelschätzers und des Lenkwinkelsensors haben diese Module nun die Daten aller am Fahrzeug verbauten Lidarsensoren erhalten. Damit wurde das Errechnen einer Trailer Pose (siehe Kapitel 3.3.6) sowie eine frei / belegt-Aussage der vorausliegenden Fahrspur im Nahbereich (siehe Kapitel 3.3.7) ermöglicht.

Kalibrierung

Auf dem Weg zur Fusion der verschiedenen Sensormodalitäten galt es einige grundsätzliche Herausforderungen zu lösen. Eine notwendige Voraussetzung war, die Daten mit zeitlich synchronisierten Zeitstempeln zu versehen, bzw. die Sensordaten zum gewünschten Zeitpunkt zu erzeugen.

Initiale Kalibrierung

Das dabei zum Einsatz kommende Verfahren bedient sich des Prinzips der Photogrammetrie, um eine hochgenaue Punktwolke des Versuchsträgers und seiner montierten Sensoren zu erhalten (siehe Abbildung 15). Dazu wurden alle zu vermessenden Oberflächengeometrien mit codierten und uncodierten optischen Markern versehen. Diese wurden anschließend durch eine Vielzahl von Fotos erfasst und mittels einer Software in eine dreidimensionale Punktwolke überführt.



Abbildung 15: Links: Der mit Markern bestückte Versuchsträger. Rechts: Die daraus erzeugte dreidimensionale Punktwolke.

Aus der so errechneten digitalen Abbildung des Versuchsträgers wurden im Anschluss die extrinsischen Kalibrierparameter der Sensoren errechnet. Diese dienten als Startwert für die weiterführende Kalibrierung.

Weiterführende Kalibrierung

Die Initiale, auf dem Prinzip der Photogrammetrie basierende Kalibrierung wurde schließlich genutzt, um die finale Kalibrierung mit einer zweiten Methode weiter zu verbessern. Dazu wurde der Versuchsträger in eine mit codierten, optischen Markern ausgestattete Halle gefahren und die Sensordaten dabei aufgezeichnet.

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

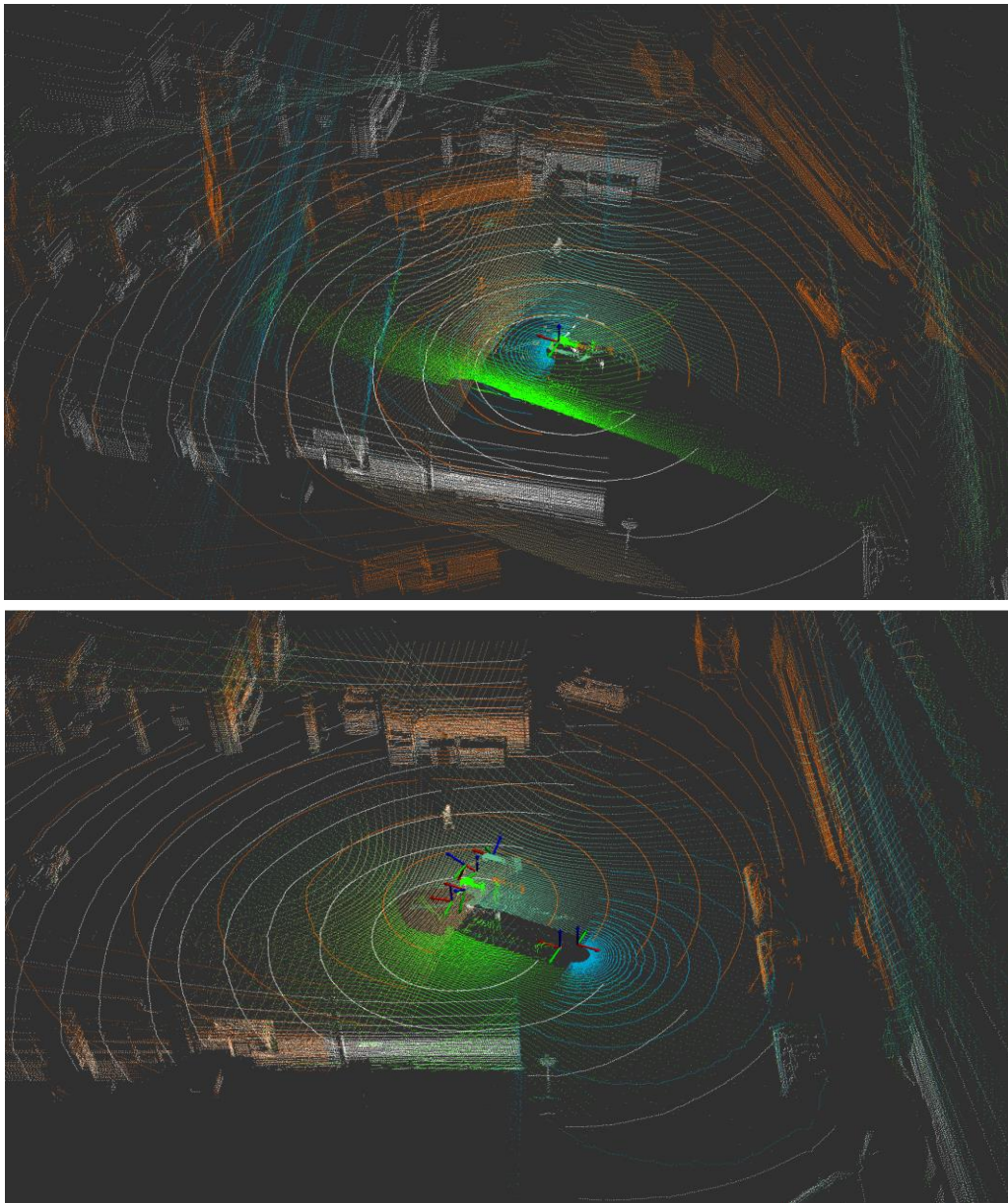


Abbildung 16: Oben: Unkalibriertes Lidar-System am Versuchsträger. Unten: Kalibriertes Lidar-System.

Tests zur Einbindung der Radare in die weiterführende Kalibriermethode

Für die Kalibrierung der Radare wurden Überlegungen getroffen, sie auch in das Verfahren für die weiterführende Kalibrierung einzubinden. Deshalb wurden Tests mit Radarreflektoren durchgeführt, welche in der Kalibrierhalle positioniert wurden. Die Radarreflektoren erfüllen den analogen Zweck von Kameramarkern bzw. Referenzflächen für die Lidare, welche für das weiterführende Kalibrierverfahren benötigt werden. Bei den Tests kamen zum einen speziell verkleidete Boards, als auch spezielle Radarreflektoren verschiedener Hersteller zum Einsatz (siehe Abbildung 17).

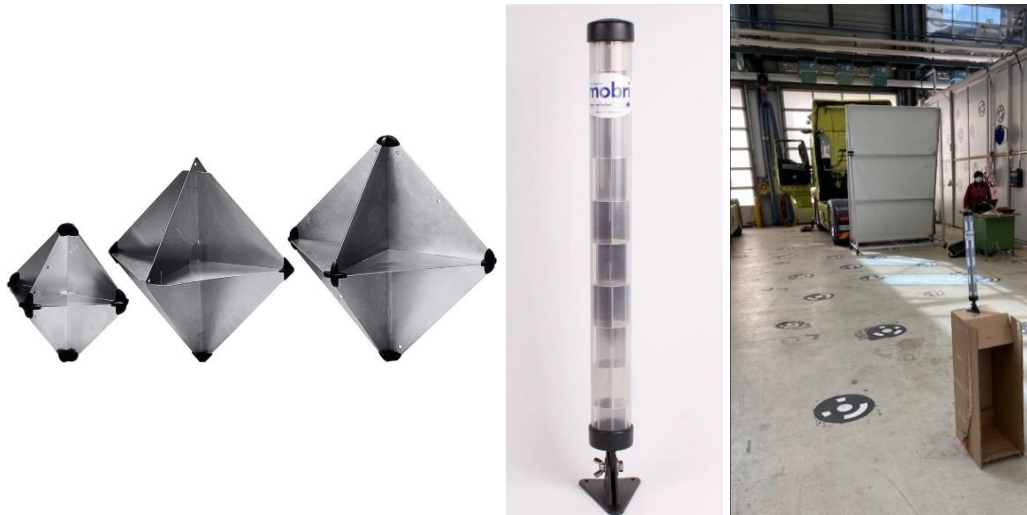


Abbildung 17: Links und Mitte: Reflektoren verschiedener Hersteller. Rechts: Test eines Reflektors in der Kalibrierhalle.

Allerdings war es nicht wie erhofft möglich, die benötigten eindeutigen Reflektionen zu erzeugen, auf welche die Kalibriersoftware angewiesen ist. Für die Kalibrierung der Radare wurde folglich auf die beschriebene photogrammetrische Kalibrieremethode zugegriffen.

Radarodometrie und -onlinekalibrierung

Die derzeit entwickelten Kalibrieremethoden sind für Kamera- und Lidarkalibrierung sehr erfolgreich, sind allerdings nur eingeschränkt geeignet, um Radare zu kalibrieren. Hierfür wurde ein eigenes Verfahren entwickelt. Die Bewegung des LKW wurde relativ zu seiner Umgebung geschätzt, indem die Dopplergeschwindigkeiten der statischen Umgebung gemessen wurden. Die Ego-bewegung bezieht sich dabei auf die Bewegung des LKW in seinem Bezugssystem. Durch die Messung der Dopplergeschwindigkeiten der Umgebung konnten die relative Bewegung des LKW im Vergleich zu seiner Umgebung ermittelt und geschätzt werden. 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.

Kalibrierungsvalidierung

Die Validierung der Kalibrierergebnisse hatte sich in der Vergangenheit als notwendig und zeitintensiv herausgestellt. Deshalb wurden verschiedene Methodiken untersucht, die erzielten Kalibrierergebnisse durch eine unabhängige Messfahrt automatisiert zu validieren. Dazu wurde ein Softwaremodul umgesetzt, welches über einen Iterative-Closest-Point-(ICP-)Algorithmus und einer hochgenauen Referenzmessung eine Korrekturmatrix für die

Lidarsensorik errechnet. Damit wurde das Ziel sogar übertroffen, nur eine Metrik für den Bedarf einer Nachkorrektur zu erhalten.

In Abbildung 18 ist die Referenzmessung des MAN Versuchshofs dargestellt, welche für die Nachkalibrierung der Lidare genutzt wurde. Die Lidardaten (bunt dargestellt) sollten durch die Nachkalibrierung mit den Punkten der Referenzmessung zusammen fallen. Die Anwendung der Nachkalibrierung ist in Abbildung 19 gezeigt. Referenz und Messung liegen nun übereinander.

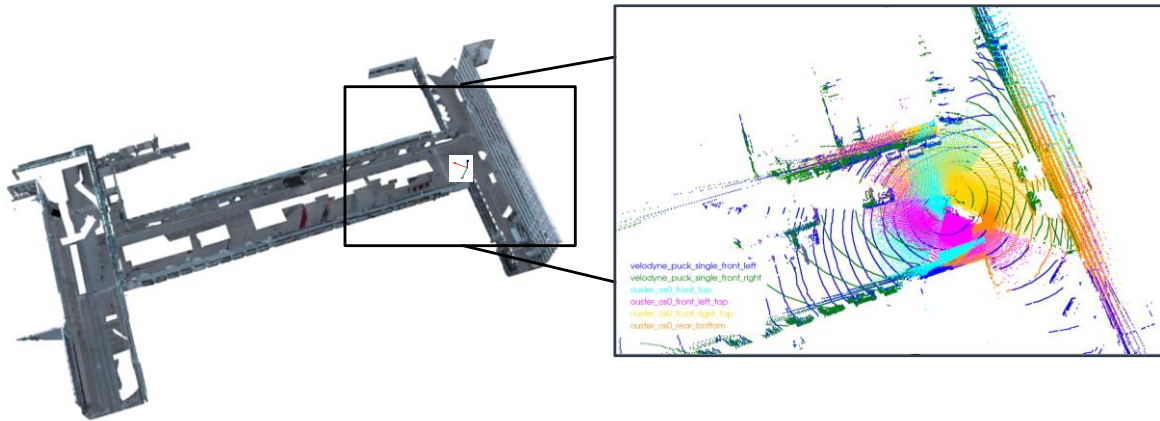


Abbildung 18: Referenzmessung des MAN Versuchshofs und der Lidardaten (bunt dargestellt).

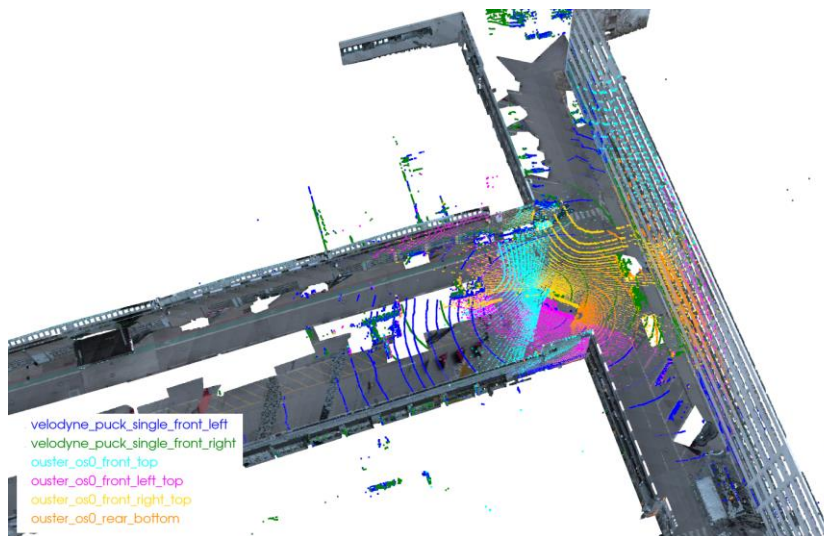


Abbildung 19: Anwendung der Nachkalibrierung. MAN Versuchshofs und der Lidardaten (bunt dargestellt).

Die erzielten Ergebnisse konnten jedoch die Ergebnisse aus dem weiterführenden Kalibrierverfahren nicht eindeutig verbessern.

Davon unabhängig wurden weitere Methodiken zur Validierung der Kalibrierergebnisse umgesetzt:

- Die Validierung der Lidarposen wurde durch einen Rekalibrierschritt erweitert, um die Ergebnisse dieser Methode visuell und numerisch bewerten zu können.

- Zusätzlich wurde das Validierungskonzept um die Domäne der Kameras erweitert. Diese konnten nun relativ zu den verbauten Lidarsensoren hinsichtlich ihrer extrinsischen Parameter bewertet werden.

Lokalisierung

Highly-Automated-Driving-(HAD-)Karte

Für die Lokalisierung, d. h. die Eigenortung des automatisierten LKW, wurde eine HAD-Karte benötigt. Mit der, für die Erstellung einer solchen Karte, notwendige Vermessung wurde ein Dienstleister beauftragt. Nachfolgende Abbildung 20 zeigt das Messfahrzeug im DBIS-Depot in Ulm und auf der MAN-Teststrecke in München.



Abbildung 20: 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 21 zeigt einen Arbeitsstand der Karte des DBIS-Depots, welche über ein Satellitenbild gelegt wurde.

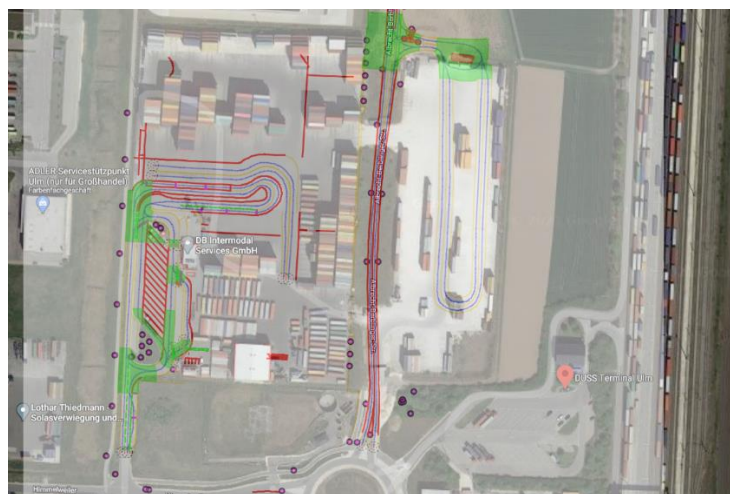


Abbildung 21: Karte des DBIS-Depots.

Auf Grund von Erneuerungen der Fahrstreifenmarkierungen im DUSS-Terminal musste der dortige Teil des Erprobungsumfelds separat vermessen und die Karte entsprechend erweitert werden.

Graphenbasierte Lokalisierung

Im ANITA Projekt wurde eine graphenbasierte Lokalisierung eingesetzt. Diese fusionierte Positionen des globalen Navigationssystems (Global Navigation Satellite System – GNSS), Odometrie und in der Umgebung detektierte Landmarken mittels eines Faktorgraphens. Das Ergebnis war einerseits eine sehr genaue, kartenrelative Pose des Fahrzeugs, welche für die Planung benötigt wurde. Andererseits wurden auch alle Landmarken geschätzt, was eine konstante Erneuerung der benutzten Karte ermöglichte (siehe Abbildung 22).

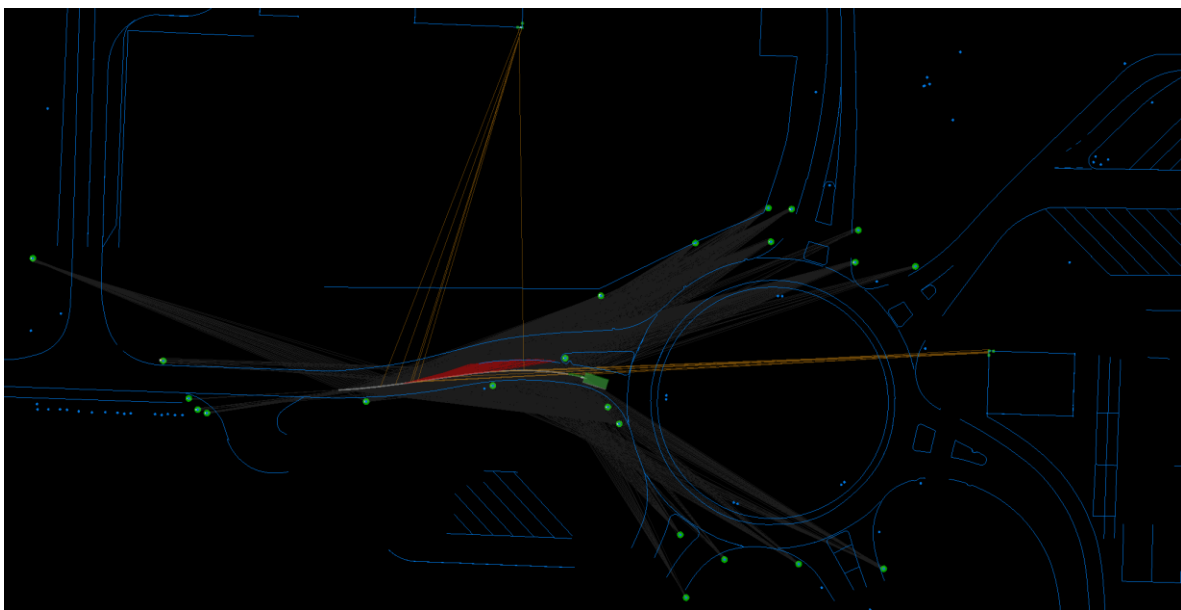


Abbildung 22: Graphenbasierte Lokalisierung. Karte (blau); zur Karte zugeordnete Landmarken (grün); Landmarkenmessungen (grau, orange und rot).

Diese Lokalisierung wurde im Fahrzeug in Betrieb genommen und im Terminal getestet. Kleinere Abweichungen zum benutzten Referenzsystem (ADMA) traten auf. Diese waren z. B. auf eine ungenaue Kalibrierung zurückzuführen. Auch ein starkes Rauschen, der mittels inertielle Messeinheit (Inertial Measurement Unit – IMU) gemessenen Beschleunigungen, führte zu Problemen. Diese wurden im Laufe des Projekts behoben.

Ein weiterer relevanter Punkt war die Schätzung der Pose des Aufliegers. Diese wurde z. B. für Kollisionschecks im Planer benötigt. In der Projektlaufzeit wurde dafür eine Erweiterung der Lokalisierung implementiert und im LKW erfolgreich eingesetzt.

Der Faktorgraph optimierte neben der Pose auch sämtliche benutzte Landmarken. Im DUSS-Terminal sollte diese Fähigkeit genutzt werden um semi-statische Objekte wie Container zur Lokalisierung heranzuziehen. Letztendlich war dies jedoch nicht nötig, da durch die hohe

Verbauposition der Lidare und deren Reichweite von 200 m immer genügend statische Landmarken in Sicht waren.

Sensordatenverarbeitung und Fusion

Datenfusion

Ein wesentlicher Bestandteil von ANITA in der Umfeldwahrnehmung war 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 23 zeigt links das Bild einer am Versuchsträger verbauten Kamera und rechts die Punktwolke der Lidare mit überlagerter Farbinformation aus dem Kamerabild.

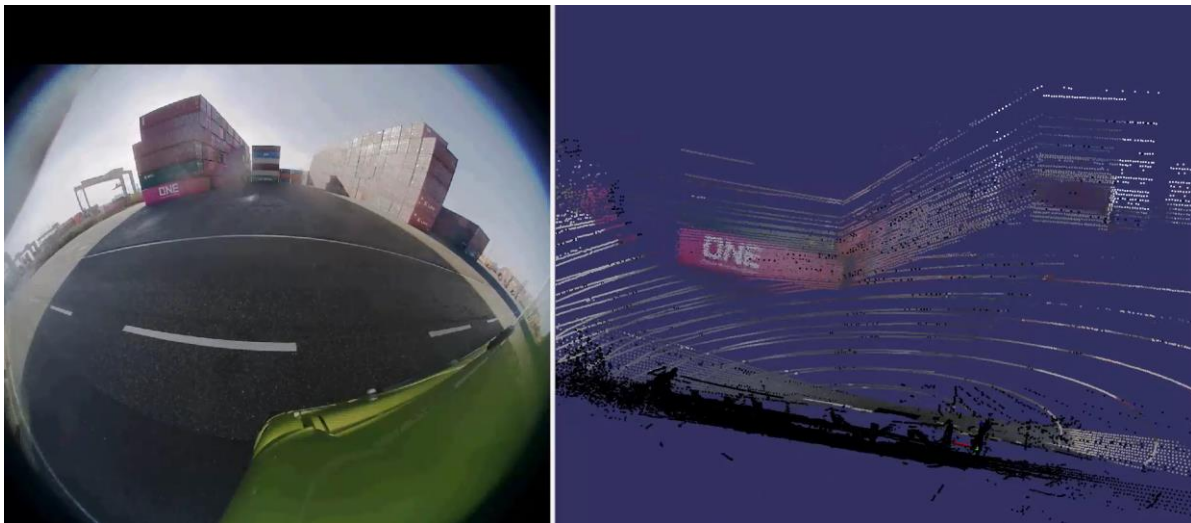


Abbildung 23: Links: Bild einer am Versuchsträger verbauten Kamera. Rechts: Punktwolke der Lidare.

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.

Herausforderungen

Auf dem Weg zur Fusion der verschiedenen Sensormodalitäten galt es einige grundsätzliche Herausforderungen zu lösen. Eine notwendige Voraussetzung war, die Daten mit zeitlich synchronisierten Zeitstempeln zu versehen, bzw. die Sensordaten zum gewünschten Zeitpunkt zu erzeugen. Weiterhin mussten große Datenmengen in Echtzeit verarbeitet

werden können. Die Fusion von vier Kameras an die Punktwolken von fünf Lidaren wurde im ANITA Projekt benutzt. Nachfolgende Abbildung 24 zeigt eine fusionierte Lidarpunktwolke mit herausgefiltertem Egofahrzeug. Der Koordinatenursprung zeigt Mitte-Hinterachse. An die Lidarpunkte wurden die Farbinformationen der Kameras angehängt.

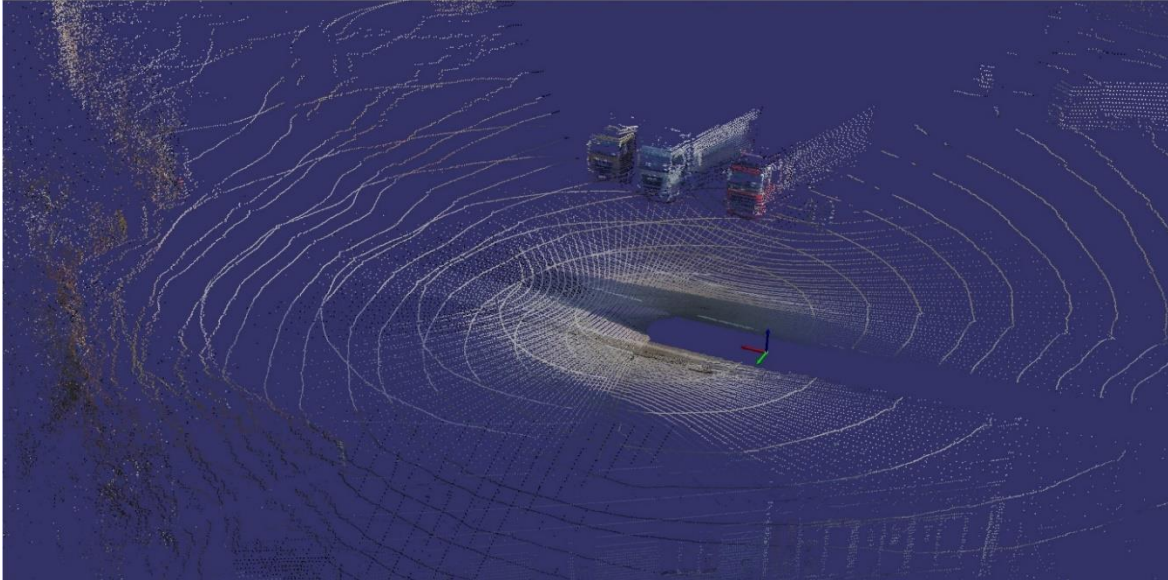


Abbildung 24: Fusionierte Lidarpunktwolke mit herausgefiltertem Egofahrzeug und überlagerten Farbinformationen.

Eine Erweiterung, welche während des Projekts implementiert wurde, war die Kompensation des Rolling-Shutter-Effekt der Kameras. Dieser war bei den verwandten Kameras recht stark (30 ms Belichtungszeit). Diese Erweiterung führte zu einer hochgenauen Zuordnung von Kamera- und Lidardaten, auch während sich der LKW bewegte (siehe Abbildung 25).

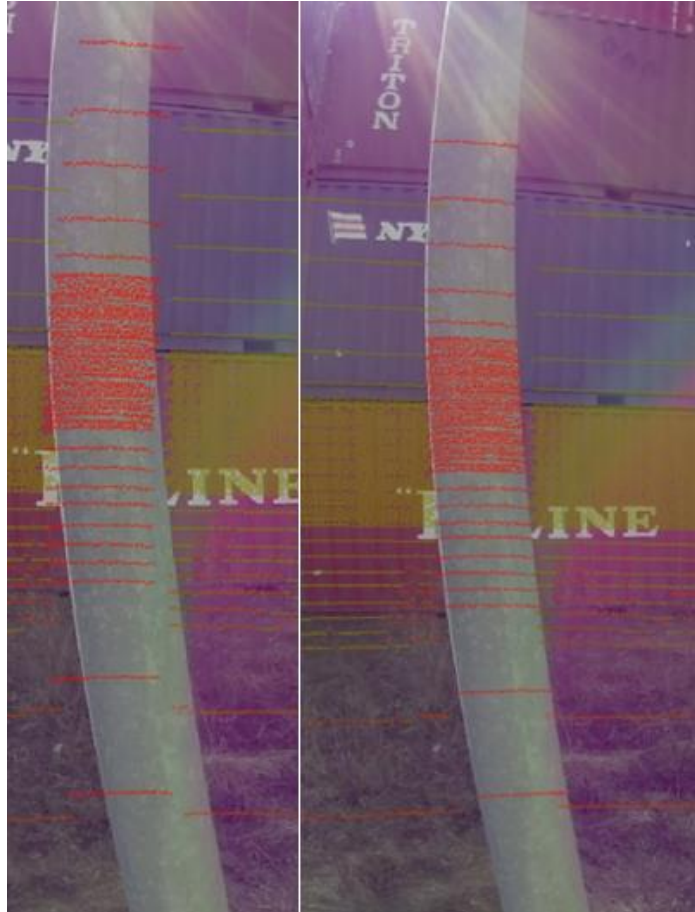


Abbildung 25: Visualisierung der hochgenauen Zuordnung von Lidar- und Kameradaten. Links: Der Rolling-Shutter-Effekt führt zu Fehlern bei der Zuordnung. Rechts: Rolling-Shutter-Effekt wird kompensiert.

Eine Stellschraube zur Performanceverbesserung war die Verarbeitung der Bilddaten. Hier mussten zunächst die Einlesezeiten / Framegrabbingzeiten der Kameras so gering wie möglich gehalten werden. Darauf folgte die Inference (Anwendung neuronaler Netze) auf den Bilddaten als nächste Optimierungsstelle. Mittels eines Spezial-PC von Nvidia konnten hier große Performancemeilensteine im Projekt errungen werden, gerade wenn sowohl das Framegrabbing und das neuronal Netz darauf ausgeführt wurden. Ermöglicht wurde dies durch Optimierungen, welche Kopiervorgänge einsparten und durch parallelisierte ablaufende Berechnungen auf der GPU. Untersuchungen haben allerdings gezeigt, dass es mit der eingesetzten Spezialhardware schwierig war, neuere Netzarchitekturen auszuführen.

Auch bei den eingesetzten neuronalen Netzen, deren Aufgabe eine semantische Segmentierung ist, gab es während des Projekts große Fortschritte. Die Qualitätsverbesserung kann an den dargestellten Bildern (siehe Abbildung 26) anschaulich beurteilt werden.

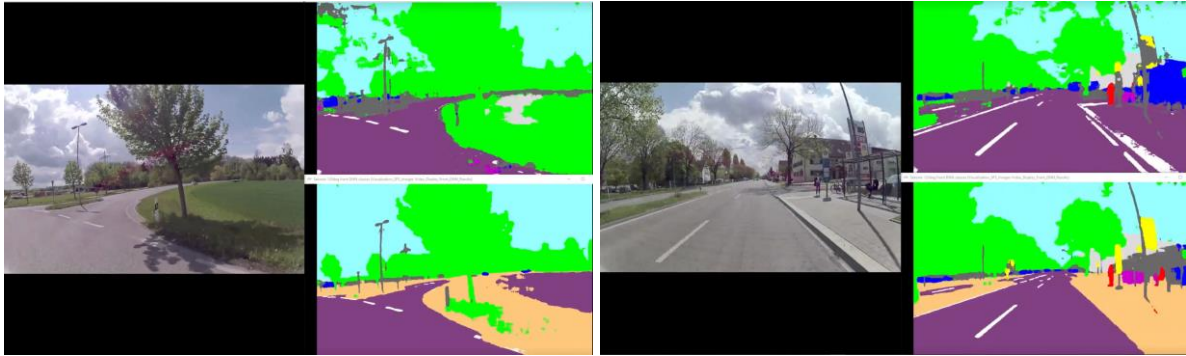


Abbildung 26: Verbesserungen der semantischen Segmentierung. Jeweils Links: Originalbild. Rechts oben: alter Stand. Rechts unten: neuer Stand.

SPS und Objektdetektion

Die SPS-Fusion fand separat pro Sensor-Cluster statt. Die Lidarpunktwolke ist das Trägermedium und wurde mit Klasseninformation aus den semantisch segmentierten Kamerabildern und den Geschwindigkeitsinformationen der Radare angereichert. Die einzelnen SPS-Punktwolken im jeweiligen Sensorkoordinatensystem wurden nun fusioniert und in das Koordinatensystem eines "virtuellen" Sensors transformiert. Diese Daten wurden für die Lokalisierung und die Objektdetektion verwendet (siehe Abbildung 27).

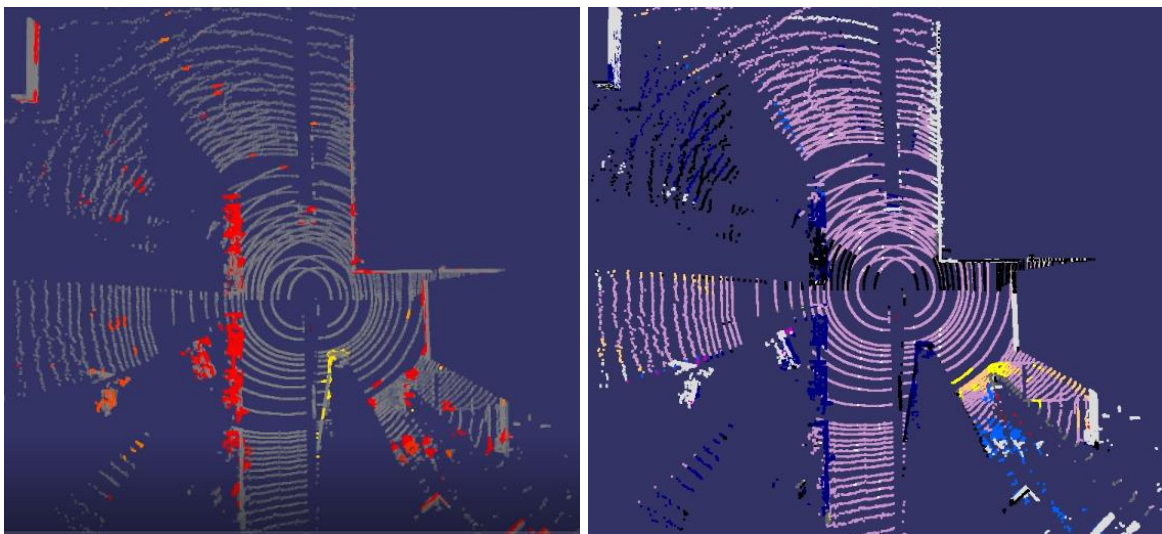


Abbildung 27: Visualisierung der fusionierten SPS-Punktwolke. Links: farbkodierte Geschwindigkeit. Rechts: semantische Segmentierung.

Objektdetektion

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-Reflexionen 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 28). Querende und entgegenkommende Fahrzeuge konnten damit in der Depot-Umgebung zuverlässig erkannt werden.



Abbildung 28: Links: Semantische Segmentierung des ursprünglichen Netzes. Rechts: Output nach dem Training.

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 Umfeldfassung weitergeleitet wurden.

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.

Im ersten Schritt wurden Algorithmen entwickelt und implementiert, um dynamische Objekte wie Fußgänger, Fahrradfahrer und andere Fahrzeuge zu identifizieren und Masken dafür zu generieren. Diese Masken dienten als Grundlage für die Entscheidungsfindung des autonomen Fahrzeugs in Echtzeit. Die Erzeugung von Masken für statische Objekte, wie Gebäude, Verkehrsschilder und Straßenmarkierungen, wurde auf die GPU verlagert. Dadurch konnte die Effizienz der Maskengenerierung erhöht werden, was zu einer schnelleren und präziseren Informationsverarbeitung führte. Die Verarbeitung der Masken für dynamische Objekte wurde ebenfalls auf die GPU ausgelagert, um eine schnellere Reaktionszeit des Systems zu gewährleisten. Dies ermöglichte eine kontinuierliche Aktualisierung der Masken in Echtzeit, was für die Sicherheit des autonomen Fahrzeugs entscheidend war. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Entwicklung eines Ausweichverfahrens basierend auf der statischen Objektmaske. Das System konnte auf dieser Grundlage autonom Entscheidungen treffen, um Kollisionen mit festen Hindernissen zu vermeiden und sicher durch die Umgebung zu navigieren. Der Bewegungsplaner wurde weiterhin mit einem Prädiktionsmodul gekoppelt, um die Reaktion des autonomen Fahrzeugs auf zukünftige Bewegungen anderer Verkehrsteilnehmer zu verbessern. Die Funktionalität des Systems wurde in Simulationen umfassend getestet, um eine sichere und zuverlässige Leistung in verschiedenen Szenarien zu gewährleisten. Abschließend wurden Tests in einer realen Zielumgebung durchgeführt. Dabei wurde die Leistung des Systems unter realistischen Bedingungen evaluiert, um sicherzustellen, dass es den Anforderungen des tatsächlichen Einsatzes gerecht wird.

Entwicklung und Integration einer Kommunikationsschnittstelle für Logistiksysteme, um einen reibungslosen Informationsaustausch zwischen verschiedenen Komponenten zu ermöglichen.

Ziel war es, eine effiziente Kommunikation zu gewährleisten und die Interaktion zwischen verschiedenen Teilen des Systems zu optimieren. Über den gesamten Projektverlauf hinweg wurde eine Kommunikationsschnittstelle mit den beteiligten Projektpartnern abgestimmt, definiert, implementiert, inkrementell integriert und schließlich erfolgreich in der Zielumgebung getestet. Zunächst wurden umfangreiche Abstimmungen mit den beteiligten

Stakeholdern durchgeführt, um die Anforderungen und Erwartungen an die Kommunikationsschnittstelle zu klären. Dabei wurden die Bedürfnisse der Partner und Systeme berücksichtigt, um eine ganzheitliche Lösung zu entwickeln. Basierend auf den Ergebnissen der Abstimmungen wurde die Kommunikationsschnittstelle definiert. Dies umfasste die Festlegung von Datenformaten, Protokollen, Schnittstellen und Kommunikationskanälen, um einen standardisierten und effizienten Informationsaustausch zu ermöglichen. Anhand eines typischen Anwendungsfalls wurde der Messageflow durch die Kommunikationsschnittstelle entworfen. Dabei wurden die verschiedenen Nachrichtentypen identifiziert, ihre Inhalte spezifiziert und der Informationsfluss zwischen den beteiligten Systemen modelliert. Zur Verwaltung und Koordination der fahrzeugseitigen Kommunikations- und Orchestrierungsaufgaben wurde ein Task Manager konzipiert und implementiert. Dieser übernahm die Aufgabe, Nachrichten zu empfangen, zu verarbeiten und entsprechende Aktionen auszulösen, um eine nahtlose Kommunikation zu gewährleisten. Die Funktionalität der Kommunikationsschnittstelle und des Task Managers wurde ausgiebig in Simulationen getestet. Dabei wurden verschiedene Szenarien und Randbedingungen berücksichtigt, um die Leistungsfähigkeit und Robustheit des Systems zu überprüfen. Abschließend wurde das Zusammenspiel der entwickelten Kommunikationsschnittstelle mit dem bestehenden Logistiksystem getestet. Unter anderem im Rahmen des durchgeführten Pilotbetriebs, wurden Missionen erfolgreich unter Nutzung der Kommunikation zwischen Terminal und automatisiertem Truck durchgeführt.

Reaktion auf Änderungen der Vorgaben durch die Terminalsteuerung

In der Erprobungs- und Pilotphase des ANITA-Projekts wurden die umfangreichen Tests des Bewegungsplanungsmoduls im Zusammenspiel mit dem Gesamtsystem in der Zielumgebung, dem DUSS-Terminal und DBIS-Depot in Dornstadt, fortgeführt. Es galt, den Reifegrad des Gesamtverhaltens des automatisierten LKW so weit zu erhöhen, dass es den an den Pilotbetrieb gestellten Anforderungen genüge. Die in der Pilotphase generierten Ergebnisse dienten innerhalb des Projekts wiederum zur Bewertung der Effizienz eines autonomen LKW in Terminalumgebungen. Damit diese Evaluierung repräsentativ und aussagekräftig sein konnte, musste die erzielte Gesamtsystemperformance ausreichend hoch sein. Dem Modul Bewegungsplanung kam in diesem Zusammenhang und in dieser Projektphase, eine besondere Bedeutung zu, da es das resultierende Verhalten des automatisierten Fahrzeuges bestimmte.

In den Tests beobachtetes, unerwünschtes Verhalten wurde in den meisten Fällen zunächst aus Sicht der Bewegungsplanung analysiert. Systemtests und Pilotbetrieb in der Zielumgebung offenbarten weitere Ursachen für unerwünschtes Verhalten des automatisierten LKW, welche in zuvor erfolgten Modul- und Integrationstests auf Teststrecken nicht aufgetreten waren. Wie schon bei vorangegangenen Tests in den Terminals beobachtet, ergaben sich besondere Herausforderungen für die Bewegungsplanung eines Sattelzugs innerhalb der starken räumlichen Begrenzungen durch enge Straßen-Geometrien und statische Hindernisse wie Container, Begrenzungssteine,

Bordsteine oder sehr nah an der Straße gebaute Gebäude. Auf Basis der Testergebnisse wurde die Fahrbarkeit der generierten Trajektorien in solchen Niedriggeschwindigkeitsszenarien weiter verbessert und in enger Abstimmung mit der Trajektorienfolgeregelung das resultierende Verhalten optimiert. Ergebnis war ein weiches, oszillationsfreies Durchfahren enger Kurven sowie das Meistern enorm herausfordernder Manöver wie Einparken in Fischgrätenparkplätze im DBIS-Depot (siehe Abbildung 29).



Abbildung 29: Anspruchsvoller Manöver-Pfad zum Einparken des autonomen Trucks in einen Fischgrätenparkplatz des DBIS-Depot. Links: Repräsentative Darstellung auf Sattelitenbild. Rechts: Visualisierung des sensorbasierten Umgebungsmodells und der geplanten Trajektorie.

Wie oben einleitend erwähnt, war ein Schwerpunkt der Entwicklung in diesem Arbeitspaket die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern in den verschiedenen, sich im Terminalbetrieb, ergebenden Verkehrsszenarien. Diese dynamischen Umgebungsbedingungen konnten erst in der Zielumgebung vollumfänglich angetroffen und analysiert werden. Die Planung eines zur Situation passenden Verhaltens des autonomen LKW ist stark von der Qualität der Prädiktionen des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer abhängig. Zur Verbesserung der Interaktion von Ego-Fahrzeug und Umgebungsverkehr wurde daher die Generierung von Prädiktionen auf spezielle Situationen im Terminal angepasst. Beispielsweise wurde das Ego-Fahrzeug an einigen Stellen im DBIS-Depot durch Prädiktionen von hinten gestört. Diese Prädiktionen sollten im Normalfall so angepasst werden, dass das Ego-Fahrzeug ohne Störung von hinterherfahrenden Fahrzeugen in der eigenen Spur fährt. Durch Anpassung der Filterungsmechanismen an spezielle Bedingungen im Terminal, konnte dieses Verhalten auch in komplexen Verkehrssituationen wieder hergestellt werden. Weitere spezielle Herausforderungen waren außerdem im DBIS-Depot häufig auftretende Staus. Das Anhalten und Abstandhalten des autonomen LKW hinter anderen Fahrzeugen wurde grundsätzlich unter anderem durch die Optimierungsziele

Kollisionsfreiheit und Spurhalten in der Bewegungsplanung sichergestellt. Wenig strukturierte Umgebungen, wie beispielsweise das Umfeld der Fischgrätenparkplätze im DBIS-Depot, welches als eine Mischung von Freiflächen und Fahrspuren beschrieben werden kann, stellten dieses Konzept vor besondere Herausforderungen. Einerseits war die regelbasierte Erstellung von Prädiktionen stark an Fahrspuren gebunden und andererseits fehlte es der ebenfalls spurgeleiteten Bewegungsplanung an übergeordneter Logik für das Verhalten auf solchen Quasi-Freiflächen. Das Auftreten von Stau in dieser Umgebung führte hier zunächst zu unerwünschtem Verhalten des autonomen Fahrzeugs und wurde durch entsprechende Anpassungen an komplexe Umgebungen im Zielfunktional des Bewegungsplaners sowie in der Prädiktionserstellung verbessert (siehe Abbildung 30).

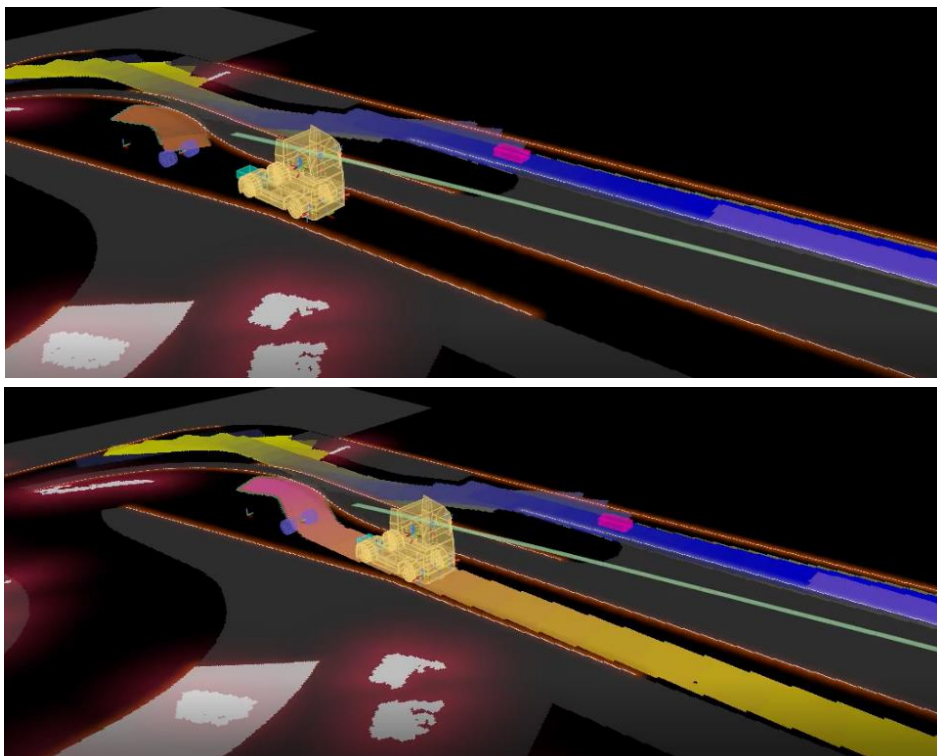


Abbildung 30: Visualisierung von Prädiktionen anderer Verkehrsteilnehmer hinter dem Ego-Fahrzeug in komplexem Terminalverkehr. Oben: Korrekte Adaption der Prädiktion an Ego-Fahrzeug. Unten: Fehlende Adaption der Prädiktion an Ego-Fahrzeug führt zu Kollisionsdetektion.

Insgesamt konnte durch die Abstimmung und Optimierung der Prädiktionserstellung und entsprechender Verarbeitung im Bewegungsplaner ein gutes Verhalten des autonomen LKW im Terminalverkehr erreicht werden. Gleichzeitig zeigte sich allerdings, dass die teils sehr speziellen Bedingungen der Infrastruktur und verbundene 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 automatisierten 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. Die Visualisierung einer solchen Trajektorie ist in Abbildung 31 dargestellt.

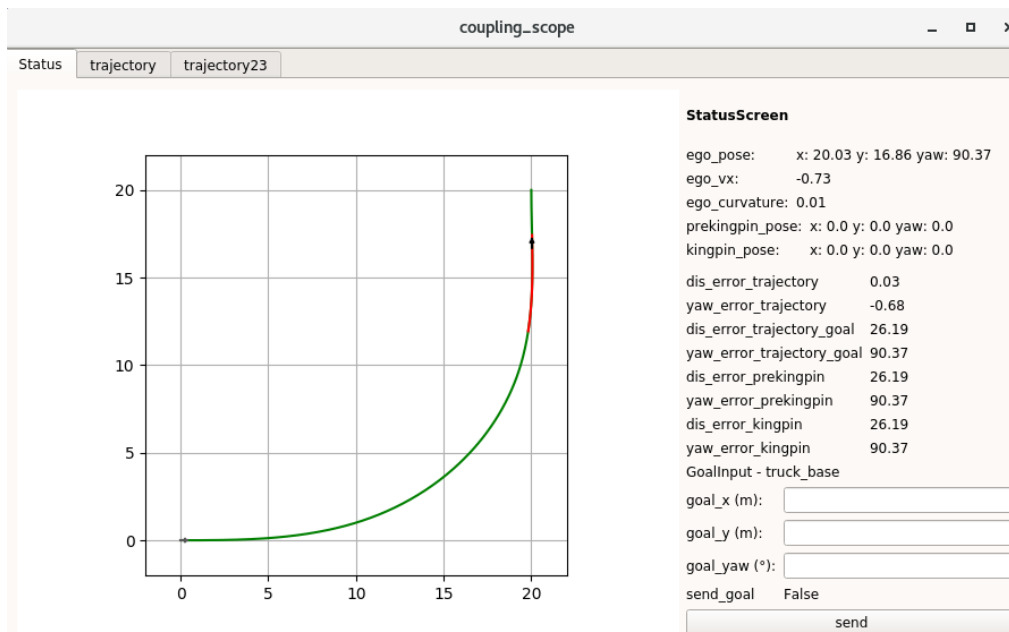


Abbildung 31: Visualisierung einer generierten Trajektorie zum automatischen Aufsatteln inklusive eines Status-Screens zur manuellen Prozessüberwachung.

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 heraus getrieben.

Abgerundet wurden die Inhalte in diesem Arbeitspaket durch die Bereitstellung von prototypischen Aktuatoren und Steuerungen zur Realisierung einer automatischen Ver- und Entriegelung von Containern (sog. Auto-Twistlocks – ATL) sowie zur Darstellung einer automatischen Auf- und Absattelfunktion unter Verwendung einer teilautomatisierten Sattelkupplung (Auto-Fifth-Wheel – AFW). Nachfolgende Abbildung 32 stellt die erarbeiteten Funktionalitäten in ihrem Zusammenhang mit der Gesamtsystemarchitektur dar.

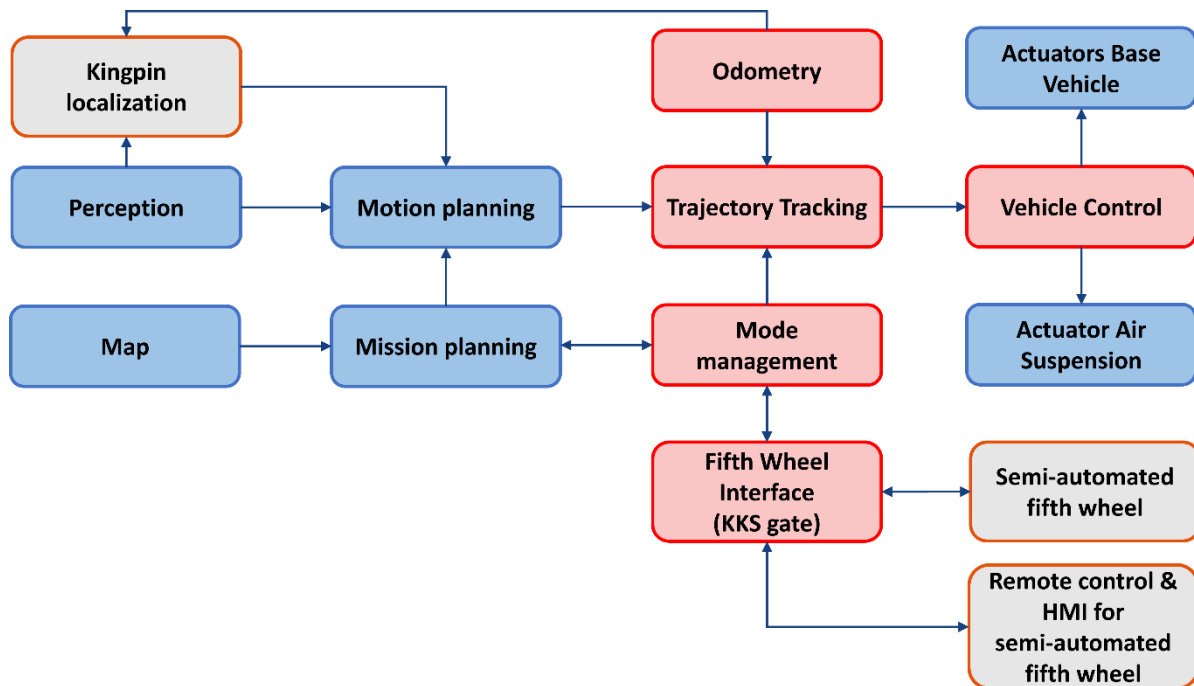


Abbildung 32: Funktionskomponenten (rot) im Gesamtsystemkontext.

Der Use-Case im Projekt ANITA stellte in Bezug auf diese Funktionalitäten in vielfacher Hinsicht eine Herausforderung dar: Zwar war die Maximalgeschwindigkeit in den beiden Terminalteilen bei DUSS und DBIS auf 25 km/h bzw. 20 km/h limitiert, jedoch war das Platzangebot begrenzt. In Folge dessen war eine sehr hohe Regelgüte erforderlich. Weiterhin addierten sich hier die Fehler aus Selbstlokalisierung und Eigenbewegungsschätzung mit den Regelfehlern der Trajektorienfolgeregelung, 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.

Funktionales Sicherheitskonzept

Für das Projekt ANITA wurden mit Unterstützung eines Gewerks Aktivitäten zur Funktionalen Sicherheit gemäß ISO 26262-3⁴ und ISO 26262-4⁵ durchgeführt. Dabei wurden für die Items „Motion Control“, „Automatische Twistlocks“ und „Automatische Sattelkupplung“ auf Basis einer Item-Definition, eine Gefahren- und Risikoanalyse durchgeführt und ein Funktionales Sicherheitskonzept erstellt. Für das Item „Motion Control“ wurde zusätzlich ein technisches Sicherheitskonzept abgeleitet. Mittels einer Fehlerbaumanalyse und einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (Failure Mode and Effects Analysis – FMEA) wurde die Vollständigkeit des Sicherheitskonzepts für die einzelnen Sicherheitsziele verifiziert.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass alle funktionalen Sicherheitsbetrachtungen auf die Absicherung der Funktionalität für den Betrieb mit einem an Bord befindlichen Sicherheitsfahrer abzielen und die Eingriffsmöglichkeit des Fahrers explizit einbeziehen. Im Rahmen dieses Berichts ist eine detaillierte Beschreibung aller Arbeitsprodukte der Funktionalen Sicherheit nicht möglich. In den nachfolgenden Abschnitten, zu den in AP 2.3.3 entwickelten Funktionen, sind jedoch die wichtigsten Ergebnisse der funktionalen Sicherheitsbetrachtung beschrieben.

⁴ Norm ISO 26262-3: Road vehicles. Concept phase, 12-2018

⁵ Norm ISO 26262-4: Road vehicles. Product development at the system level, 12-2018

Vehicle Control und Mode Management („Fahrzeugschnittstelle“)

Wird das Automatisierungssystem mit an Bord befindlichem Sicherheitsfahrer betrieben, ist es naheliegend, alle funktionalen Sicherheitsmechanismen im Hinblick auf die Kontrollierbarkeit und Übersteuerbarkeit jedweder Steuerbefehle zu gestalten. In der konkreten Implementierung nutzte die Vehicle Control die Schnittstellen zu bestehenden Regelkreisen serienmäßiger Assistenzsysteme, deren Absicherungsmechanismen dieselben Ziele verfolgten. Die für die Funktionale Sicherheit gewählte Systemgrenze umfasste das Betriebsmodusmanagement sowie Schnittstellen zu Steuerfunktionen für Antrieb mit Getriebe, Bremsanlagen, Lenkung sowie Licht- und Chassis-Funktionen inklusive Niveauregulierung der Luftfederung (siehe Abbildung 33 und Abbildung 34).

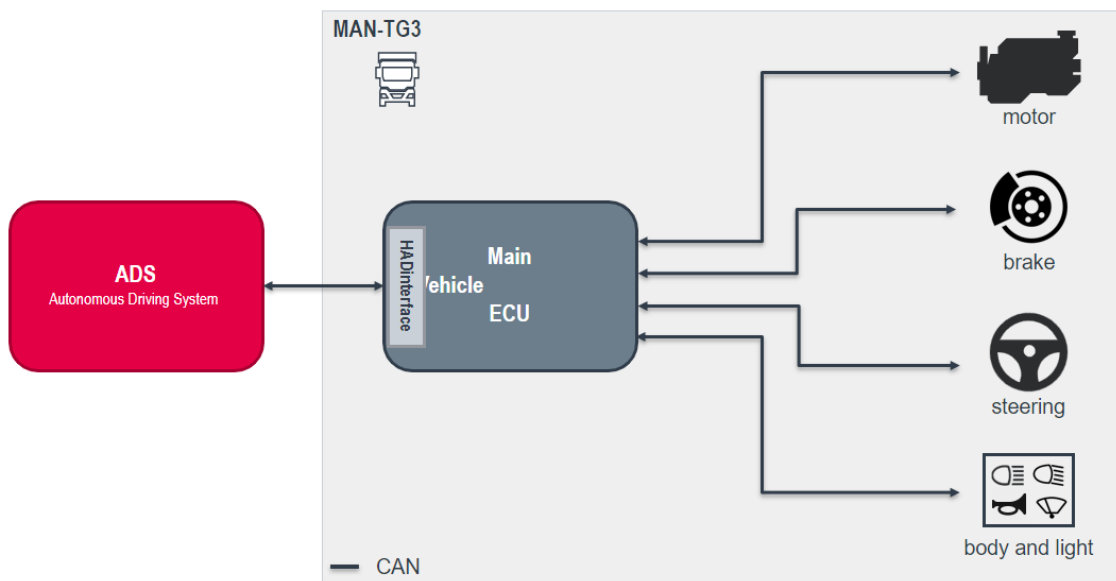


Abbildung 33: Fahrzeugschnittstelle: Allokation der Fahrzeugschnittstelle auf Fahrzeug-Steuergerät (Electronic Control Unit – ECU) und CAN-Anbindung.

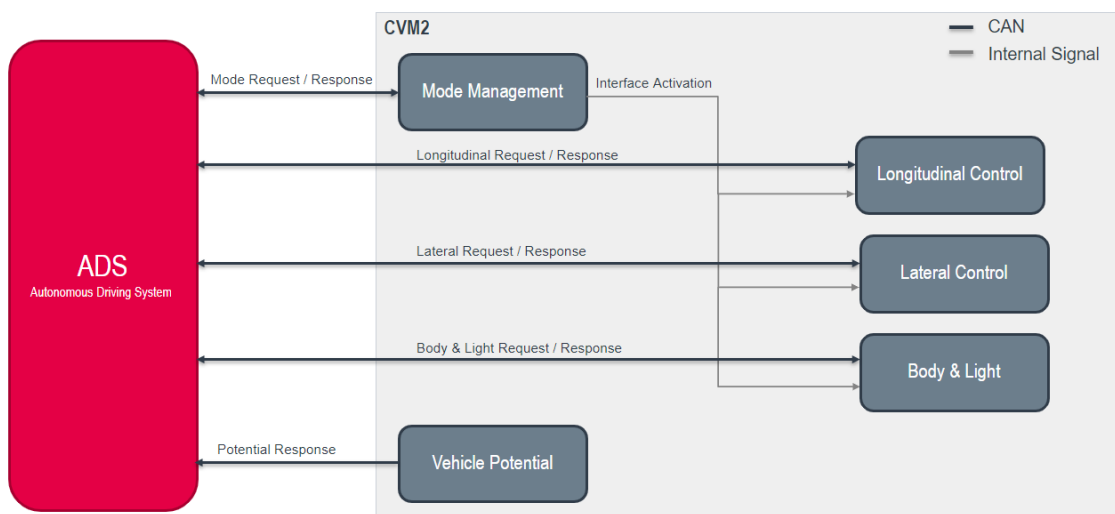


Abbildung 34: Fahrzeugschnittstelle: Funktionale Sicht auf Vehicle Control und Mode Management.

Gemäß gängiger Praxis folgte die Funktionale Sicherheitsbetrachtung möglicher Fehlfunktionen der ansteuerbaren Aktuatoren in allen Szenarien innerhalb der mittels Werksanalyse identifizierten Szenarienmenge der Operational Design Domain (ODD) in ANITA. Es ergaben sich die in Tabelle 2 aufgeführten Funktionalen Sicherheitsziele.

Tabelle 2: Funktionale Sicherheitsziele für die Fahrzeugschnittstelle

ID	Sicherheitsziel
MC_1	Verhindere ungewollte Bremsengriffe
MC_2	Verhindere ungewollte Beschleunigung
MC_3	Verhindere ungewollte Lenkeingriffe
MC_4	Verhindere ungewollte Fahrtrichtungswechsel des Getriebes

Im Projekt ANITA wurde ein Prototyp entwickelt und daher war eine zwingende Anwendung der ISO 26262 nicht erforderlich. Es zeigte sich jedoch, dass die identifizierten Hazards und Sicherheitsziele den Funktionen bestehender Fahrerassistenzsystem (Advanced Driver Assistance System – ADAS) so ähnlich waren, dass sich bei geschickter Wahl der Funktionsallokation, deren nach Serienprozess und damit unter Einhaltung der ISO 26262 entwickelte funktionale Sicherheitsmechanismen, weitestgehend mitnutzen lassen konnten. Hierzu zählten beispielweise die Limitierung von Bremsengriffen auf einen Komfortbremsungsschwellwert innerhalb der Bremsensteuerung oder die Limitierung von Lenkeingriffen auf Seiten des Lenkactuators, sowie die Absicherung gegen ungewolltes Anfahren oder Beschleunigen des ACC-Systems. Sofern, bedingt durch Unterschiede in der ODD, höhere Anforderungen an eine Funktion, im Vergleich zur ADAS-ODD, gestellt wurden, konnten externe Maßnahmen, wie z. B. spezielle Anweisungen an den Sicherheitsfahrer für bestimmte Situationen, in das projektspezifische Training des Sicherheitsfahrers aufgenommen werden. Beispielsweise das Einlegen der Feststellbremse gegen ungewolltes Anfahren bei längeren automatisierten Standphasen.

Trajektorienfolgeregelung

Die TC hatte die Aufgabe, geeignete abstrakte Steuerbefehle zur Weiterleitung an die Fahrzeugschnittstelle zu berechnen, so dass das Fahrzeug in seinem Zustand (Ort, Zeit, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, Orientierung und Drehraten) der Sollvorgabe der Bewegungsplanung (Solltrajektorie) möglichst präzise folgte. Da im Terminal eine Interaktion mit mehr oder weniger dynamischen Objekten erfolgte, musste das Fahrzeug nicht nur dem richtigen räumlichen Pfad mit der richtigen Geschwindigkeit folgen, sondern sich auch zum richtigen Zeitpunkt im richtigen Zustand befinden – es war also, anstelle einer im ADAS-Bereich verbreiteten Pfadfolgeregelung, eine Trajektorienfolgeregelung erforderlich. Dabei wurde der Bewegungsplan üblicherweise von der letzten geplanten Position fortgeschrieben

und nur bei großen Regelabweichungen mit dem Ego-Zustand reinitialisiert; ein Ansatz der als Bi-Level-Stabilisierung bezeichnet wird (Werling, 2014).

Zu Beginn des Projekts ANITA konnte auf eine bestehende TC-Implementierung aus einem Vorgängerprojekt zurückgegriffen werden. Diese wurde innerhalb des Projekts ANITA optimiert und auf ein neueres Entwicklungsframework und ein leistungsfähigeres Rapid-Control-Prototyping-(RCP-)Zielsteuergerät portiert.

Die TC wurde auf dem RCP-Steuergerät gemeinsam mit dem Betriebsmodusmanagement des automatisierten Fahrsystems (Automated Driving System – ADS) sowie spezifischen Funktionen zur Umsetzung des automatisierten Auf- und Absatteln und zur Steuerung von Umschlagvorgängen mittels ATL-Funktion und Missionsplanung (vgl. Kapitel 3.3.2 Task Manager) ausgeführt.

Dieses Softwarepaket wurde im Verlauf des Projekts mit der Vehicle Control Fahrzeugschnittstelle sowie aktualisierten Funktionsmodulen zur Selbstlokalisierung und Eigenzustandsschätzung integriert. Die Anpassung betraf auch eine Erweiterung der zur Verfügung stehenden Entwicklungsinfrastruktur, wie zum Beispiel Logging, Open- und Closed-Loop Simulationsumgebung sowie die Continuous-Integration/Continuous-Delivery-(CI/CD-)Toolchain.

Im Kontext dieses Unterarbeitspakets wurde ein Tool zur Extraktion und Visualisierung von Key Performance Indicators, aus im Fahrzeug aufgezeichneten oder aus Simulation gewonnenen Messdaten entwickelt. Abbildung 35 und Abbildung 36 zeigen schematisch die Ausgabe des Visualisierungstools am Beispiel einer automatisierten Fahrt gegen Ende der Pilotbetriebsphase im DUSS-Terminal mit der finalen Reglerkonfiguration, wobei neben Zeitverläufen von Geschwindigkeit und Regelfehlern auch Fehlerstatistiken in Form von Histogrammplots ausgegeben werden. Es wird ersichtlich, dass eine hohe Regelgüte mit mittleren Regelfehlern $< 0,5$ m in Längsrichtung und $< 0,1$ m in Querrichtung erzielt werden konnten.

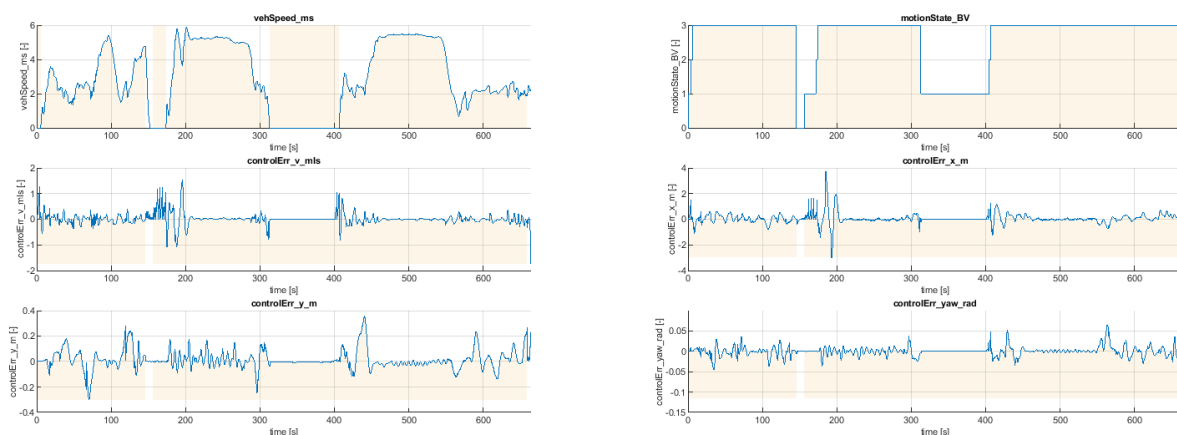


Abbildung 35: Geschwindigkeit und Zeitverlauf Regelfehler, Strecke: DUSS-Einfahrt nach Ausfahrt, am 22.09.2023.

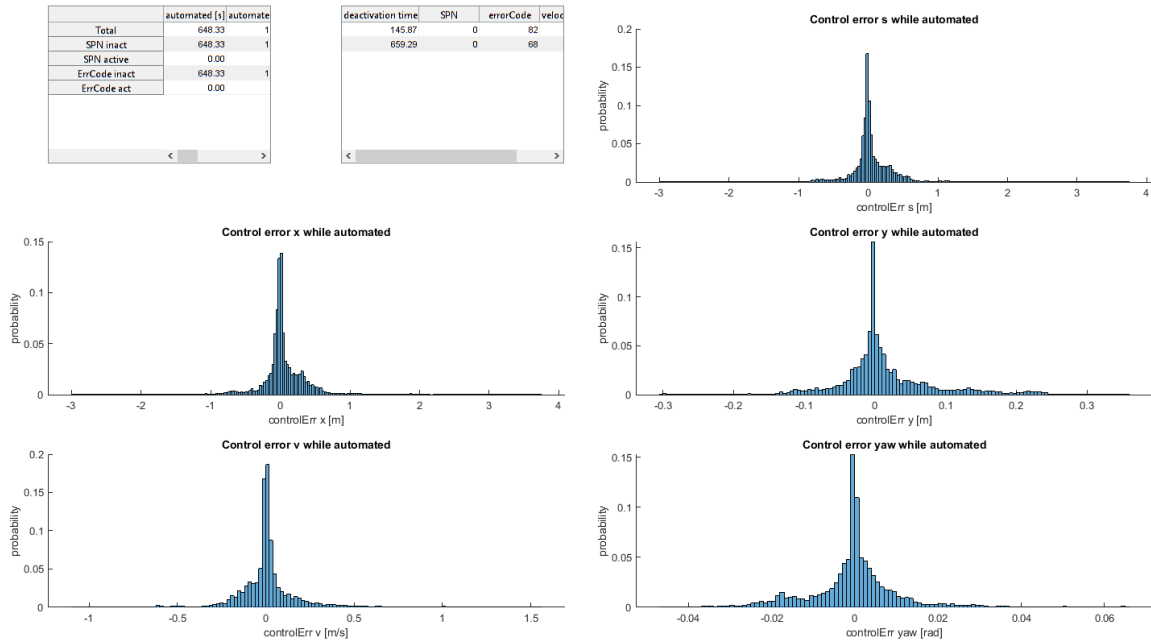


Abbildung 36: Statistik der Regelfehler. Strecke: DUSS-Einfahrt nach Ausfahrt, am 22.09.2023.

Self Awareness

Die im vorherigen Abschnitt beschriebene Präzision der Trajektorienfolgeregelung war nur in Verbindung mit einer hochgenauen Selbstlokalisierung des Fahrzeugs innerhalb der beengten Platzverhältnisse ausreichend, um Missionen innerhalb des Terminals kollisionsfrei zu absolvieren. Basis war eine auf Onboard-Sensoren, wie IMU oder Raddrehzahlsensoren, basierende Eigenzustandsschätzung für das Truck-Chassis, deren Beschleunigungs- und Drehratenausgangssignale auch zu lokal referenzierten Positionsinformationen aufintegriert wurden.

Eine globale Referenzierung, also eine eindeutige Bestimmung der Position innerhalb des Terminals wurde erst durch Fusionierung mit GNSS oder HD-Karteninformationen möglich – wobei in ANITA der letztgenannte Ansatz verfolgt wurde (siehe Kapitel 3.3.1). Die Bestimmung der globalen Position innerhalb des Terminals war sowohl bei der Nutzung von GNSS als auch unter Nutzung sensorisch erfasster Landmarken aufgrund der Gegebenheiten im Terminal (veränderliche Containerstapel und z. T. hohe Dichte weiterer Fahrzeuge) immer wieder zeitweise eingeschränkt, so dass hohe Anforderungen hinsichtlich Genauigkeit und Driftstabilität an die Eigenbewegungsschätzung gestellt wurden. Der Anwendungsfall des automatisierten Auf- und Absatteln erweiterte diese Anforderungen auch für den Niedergeschwindigkeits- und Rangierbetrieb, vgl. hierzu Anforderungen der Kingpin-Lokalisierungsfunktion des Projektpartners Götting.

Abbildung 37 stellt Ein- und Ausgangsgrößen der Eigenbewegungsschätzung schematisch dar.

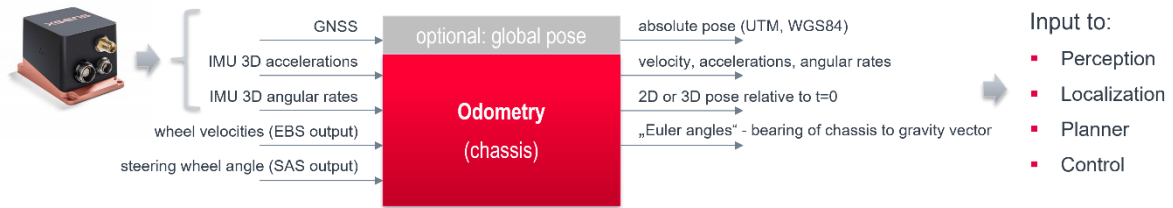


Abbildung 37: Schematische Darstellung der Eingangs- und Ausgangsgrößen der Eigenbewegungsschätzung.

Über die Laufzeit des Projekts ANITA wurde eine aus einem Vorgängerprojekt bestehende Lösung zur Eigenzustandsschätzung auf ein neues Entwicklungsframework, sowie ein verändertes Sensorsetup und ein Grundfahrzeug einer neueren Bauart adaptiert und optimiert, bis die Anforderungen des ANITA Use Cases erfüllt werden konnten.

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.

Eine ungewollte Betätigung dieser Aktuatoren bei voller Fahrt würde zum Verlust des Anhängers oder zu instabilem Fahrverhalten des Zugs führen, was schwerste Unfälle mit Schwerverletzten und Todesopfern zur Folge hätte und demzufolge besondere Absicherungsmechanismen zur Vermeidung solcher Situationen notwendig waren. In der Funktionalen Sicherheitsbetrachtung wurde dies mittels einer systematischen Betrachtung aller möglichen Fehlfunktionen und der resultierenden Fehlfunktionen in unterschiedlichen Szenarien hinsichtlich ihres Gefährdungspotenzials und Kontrollierbarkeit bestätigt und die in Tabelle 3 dargestellten Sicherheitsziele abgeleitet.

Tabelle 3: Funktionale Sicherheitsziele für die Funktion AFW

ID	Sicherheitsziel
AFW_1	Verhindere ungewolltes Öffnen / Entriegeln der Sattelkupplung
AFW_2	Verhindere ungewollt ausbleibendes Schließen / Verriegeln der Sattelkupplung
AFW_3	Verhindere ungewolltes Ausfahren der Aufliegerstützen

Die Risikobewertung der Sicherheitsziele resultierte aus Hochgeschwindigkeitsszenarien, während der eigentliche Auf- und Absattelbetrieb bei geringen Geschwindigkeiten stattfand. Maßgeblich für die Entwicklung des Funktionalen Sicherheitskonzepts war demzufolge die Unterbrechung aller Schnittstellen zum Automatisierungssystem und die Abschaltung der Energieversorgung aller Aktuatoren oberhalb einer Mindestfahrgeschwindigkeit.

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 Hinterachslufffederung als Erweiterung der Fahrzeugschnittstelle.

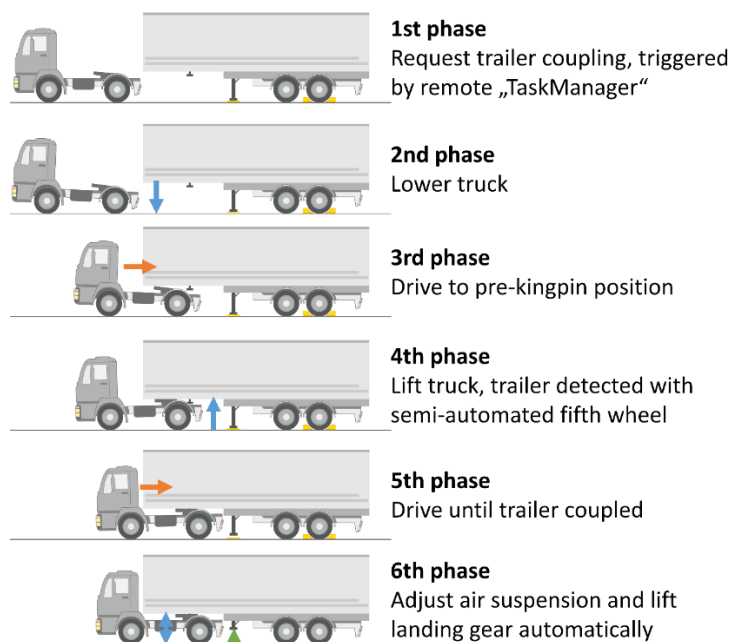


Abbildung 38: Phasen des Vorgangs zum automatisierten Auf- und Absatteln.

Abbildung 38 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 38 genannten Teilschritte des Ankoppelns – und in analoger Weise die des Abkoppelns – in Form eines Zustandsautomaten abbildete und innerhalb jedes Vorgangs die erforderlichen Unterroutinen von Missionsplanung, Regelung, Steuerung der Sattelkupplung aufruft.

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.

In Analogie zum AFW-System wurden die Fehlfunktionen der Aktuatoren des Systems in der Gefahren- und Risikoanalyse untersucht. Tabelle 4 fasst die resultierenden Sicherheitsziele zusammen.

Tabelle 4: Funktionale Sicherheitsziele für die Funktion ATL

ID	Sicherheitsziel
ATL_1	Verhindere ungewolltes Entriegeln der Twistlocks
ATL_2	Verhindere ungewollte Betätigung der Fertigerbremse des Anhängers

Auch im Fall der ATL-Funktion geht im Betrieb mit Sicherheitsfahrer die größte Gefährdung von ungewollter Aktuierung aus, mit der Folge eines Ladungsverlusts bei Herunterfallen des Containers sowie Kollisionen mit rückwärtigem Verkehr bei ungewollter Betätigung der Bremse des Anhängers über die Fertigerbremsfunktion. Die abgeleiteten technischen Sicherheitsmechanismen zur Erfüllung der Sicherheitsziele basierten auch in diesem Fall in einer Abschaltung der Schnittstelle zur Fertigerbremse oberhalb einer Grenzggeschwindigkeit und einer Freischaltung der Entriegelung von Twistlocks nur bei Stillstand mit eingelegter Bremse.

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 aus AP 1 (siehe Kapitel 2), 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 dienen 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 39: 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 39 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).

Anforderungen an die Hardware

Die Recherche zu bereits am Markt verfügbaren Leuchtelementen hat ergeben, dass es aktuell keine Leuchtelemente „out of the box“ gibt, welche alle Anforderungen an ein automotive taugliches, externes HMI für den Einsatz an einem autonom fahrenden LKW erfüllen. Lösungen mit erhältlichen LED-Streifen erfüllen zwar die Anforderung an die Farbigkeit, und kombiniert mit lichtstreuenden Silikonschläuchen, auch gestalterische Anforderungen an die Homogenität der Leuchtelemente, diese sind aber bei Sonne nicht mehr wahrnehmbar (siehe Abbildung 40 links). Kennleuchten, welche ebenso die Anforderungen an die Farbigkeit erfüllen und für den industriellen Einsatz, in z. B. Fabriken vorgesehen sind, weisen aktuell ebenso nicht die erforderliche Lichtstärke auf (siehe Abbildung 40 mitte). Dies wurde anhand von bestellten Testleuchten identifiziert. Handelsübliche Blitz- oder Kennleuchten weisen zwar die erforderliche Lichtstärke auf, stehen aktuell jedoch nicht in der erforderlichen Farbigkeit zu Verfügung (siehe Abbildung 40 rechts).



Abbildung 40: Links: LED Leuchtbalken im Sonnenlicht. Mitte: Kennleuchte für den industriellen Einsatz. Rechts: Handelsübliche Blitzleuchte.

Aus diesen Untersuchungen und aus Gesprächen mit den internen Leuchtspezialisten folgte, dass Leuchtelemente in der erforderlichen Helligkeit und Farbigkeit extra entwickelt werden müssen oder alternativ auf eine andere Farbe ausgewichen werden muss. Abstriche bei der Helligkeit sollen nicht gemacht werden.

Bei der Auswahl der zu verwendenden Leuchtelemente spielte ebenso der zu Verfügung stehende Bauraum eine Rolle. Dieser wurde, parallel zur Untersuchung der Stärke der Leuchtmittel, jeweils an CAD-Modellen und am Fahrzeug mit Testaufbauten geprüft. Dazu gehörte sowohl der Bauraum für das Leuchtmittel an sich, als auch Platz für entsprechende Halterungen.

Für die nahe Umfeldkommunikation, z. B. mit einem Fahrer welcher das Fahrzeug manuell abstellt, aussteigt und dann das autonome System aktiviert, wurde ein LED-Streifen am Türgriff der Fahrertür angebracht (siehe Abbildung 41). Dieser kann verschiedene Zustände durch entsprechende Farben visualisieren. Beispielsweise Cyan als Bestätigung der Aktivierung des autonomen Systems oder rot als Signal nicht einzusteigen. Der LED-Streifen am Türgriff wurde anhand von Testaufbauten, Materialuntersuchungen und Machbarkeitstests mit Kabelführung entwickelt und prototypisch aufgebaut.

Die Entscheidung zu Positionierung, Verständlichkeit und Wahrnehmbarkeit ist durch eine eigens durchgeführte Virtual-Reality-Studie mit 60 externen Probanden gestützt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse fließen in die weitere Iteration mit ein.

Mit der iterativen Entwicklung des HMI-Konzepts wurden die Schnittstellen zur Ansteuerung definiert und mit der Funktionsentwicklung abgestimmt. Dabei wurden die Signale für die verschiedenen Zustände des externen HMI festgelegt und in Signallisten festgehalten.

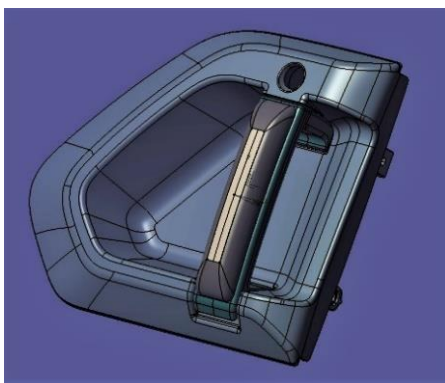


Abbildung 41: LED-Streifen am Türgriff der Fahrertür.

Umsetzung des externen HMI

Nach sorgfältiger Prüfung der Optionen wurde beschlossen, leuchtstarke Blitzleuchten einer bestimmten Firma zu verwenden. Diese weisen die erforderliche Lichtstärke auf, sind jedoch nicht vollumfänglich in der erforderlichen Farbigkeit (Cyan und Grün) verfügbar. Grüne Blitzleuchten sind bereits in Serie, cyan-farbige jedoch nicht. Als Lösung, um cyan-farbige Leuchten zu simulieren, wurde das transparente Glas von weiß leuchtenden Blitzleuchten in der entsprechenden Farbe von außen lackiert. Damit muss für jede Farbe (Cyan und Grün) je eine explizite Blitzleuchte verwendet werden. Daher werden in den entsprechenden Sichtbereichen am Dach, sowie an der Seite, die Leuchten doppelt in jeweils einer der Farben verbaut. Dies ist in Abbildung 42 gezeigt.



Abbildung 42: Links: Cyan lackierte Blitzleuchten. Rechts: Doppelt verbaute Blitzleuchten in grün und cyan.

Die Positionierung der Leuchten wurde in CAD geplant und anschließend am Fahrzeug überprüft, mit folgendem Ergebnis: Vier cyan-farbige Blitzleuchten wurden an der Front befestigt. Zwei davon wurden mit additiven 3D-Druck Adaptern im Lufteinlass befestigt. Die anderen zwei wurden in einem Ausschnitt der Frontklappe angebracht. An den Seiten wurden ebenfalls je vier Blitzleuchten mit 3D-Druck Adaptern befestigt. Es wurden jeweils eine grüne und eine cyan-farbige Leuchte zusammen angebracht. Die Paare befinden sich an den seitlichen Aerodynamik-Bauteilen in zwei unterschiedlichen Höhen. Ebenso wurden am Dach vier Blitzleuchten in grün und cyan, zu jeweils zwei Paaren zusammengefasst, befestigt. Siehe hierzu Abbildung 43 und für eine Gesamtübersicht Abbildung 44.



Abbildung 43: Links: 3D-Druck Adapter Front. Mitte: Einbauposition Frontklappe. Rechts: Einbaupositionen Seite.



Abbildung 44: Externes HMI-Konzept Gesamtübersicht.

Für die nahe Umfeldkommunikation wurde entschieden, einen LED-Streifen mit einem 3D-Druck Adapter additiv am Türgriff zu befestigen (siehe Abbildung 45). Der Türgriff leuchtet in grün (Einsteigen erlaubt) oder rot (einsteigen nicht erlaubt). Nach der Aktivierung des automatisierten Systems blinkt er als bestätigendes Feedback für den Fahrer kurz in Cyan auf.



Abbildung 45: Links: 3D-Druck Adapter mit LED-Streifen am Türgriff. Mitte und Rechts: Türgriff leuchtet in grün oder rot.

Die Ansteuerung der Blitzleuchten erfolgt über einen in das Fahrzeug integrierten HMI-Rechner. Dieser empfängt über DDS-Signale von den Automatisierungskomponenten und steuert über CAN die Blitzleuchten an. Mit Hilfe eines HMI-Testaufbaus konnte die Ansteuerung der Blitzleuchten noch vor dem finalen Verbau im Fahrzeug getestet werden.

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 46 schematisch dargestellt.

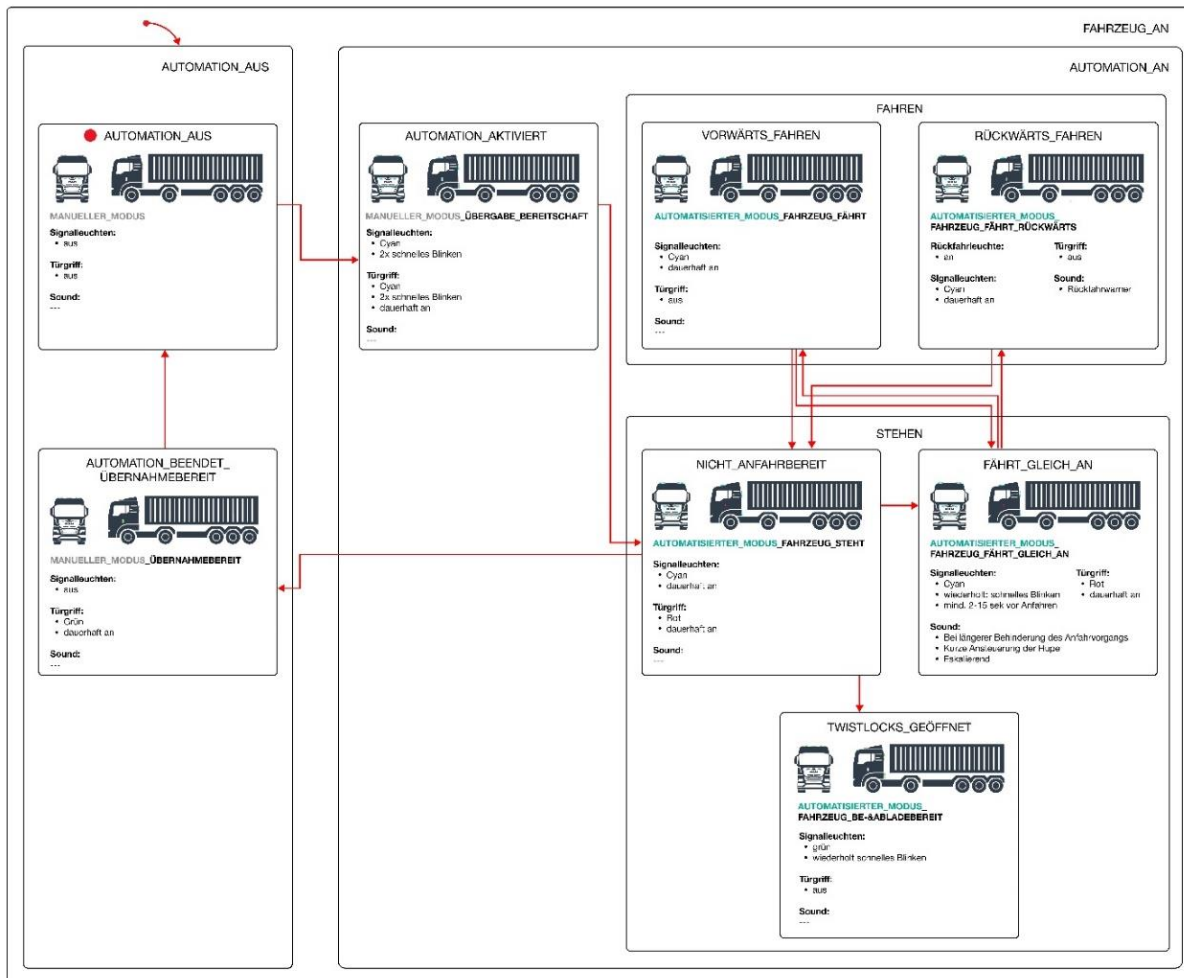


Abbildung 46: Schematische Darstellung des State-Chart des externen HMI-Detailkonzepts.

Zum Testen des externen HMI-Konzepts wurden alle Blitzleuchten die am Testfahrzeug verbaut werden sollen, in einen Tischaufbau integriert (siehe Abbildung 47). Dies beinhaltet alle 16 Blitzleuchten, den LED-Streifen am Türgriff, Verkabelung, Ansteuerungsmodul und Spannungsquellen. Am Tischaufbau wurden die Punkte Kommunikation, Schnittstellen und Ansteuerung getestet und bei Bedarf angepasst. Nach erfolgreichem Testing wurde das externe HMI-Konzept am Versuchsträger integriert.

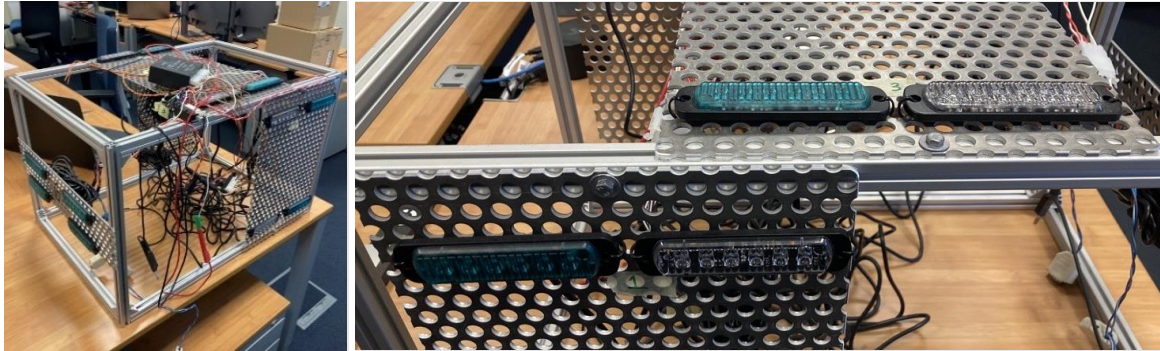


Abbildung 47: Tischaufbau zum Testen des externen HMI-Konzepts.

Anzeige für den Sicherheitsfahrer

Die benötigten Anzeigen für den Sicherheitsfahrer wurden zwischen den Funktionsentwicklern und dem HMI-Team abgestimmt und in einem State-Chart festgehalten (siehe Abbildung 48).

Zusätzlich wurde eine Anzeige für die Funktion „Hinderniserkennung zur Kollisionsvermeidung“ im Clusterinstrument integriert um diese bewerten zu können. Die Umsetzung wurde 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 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.

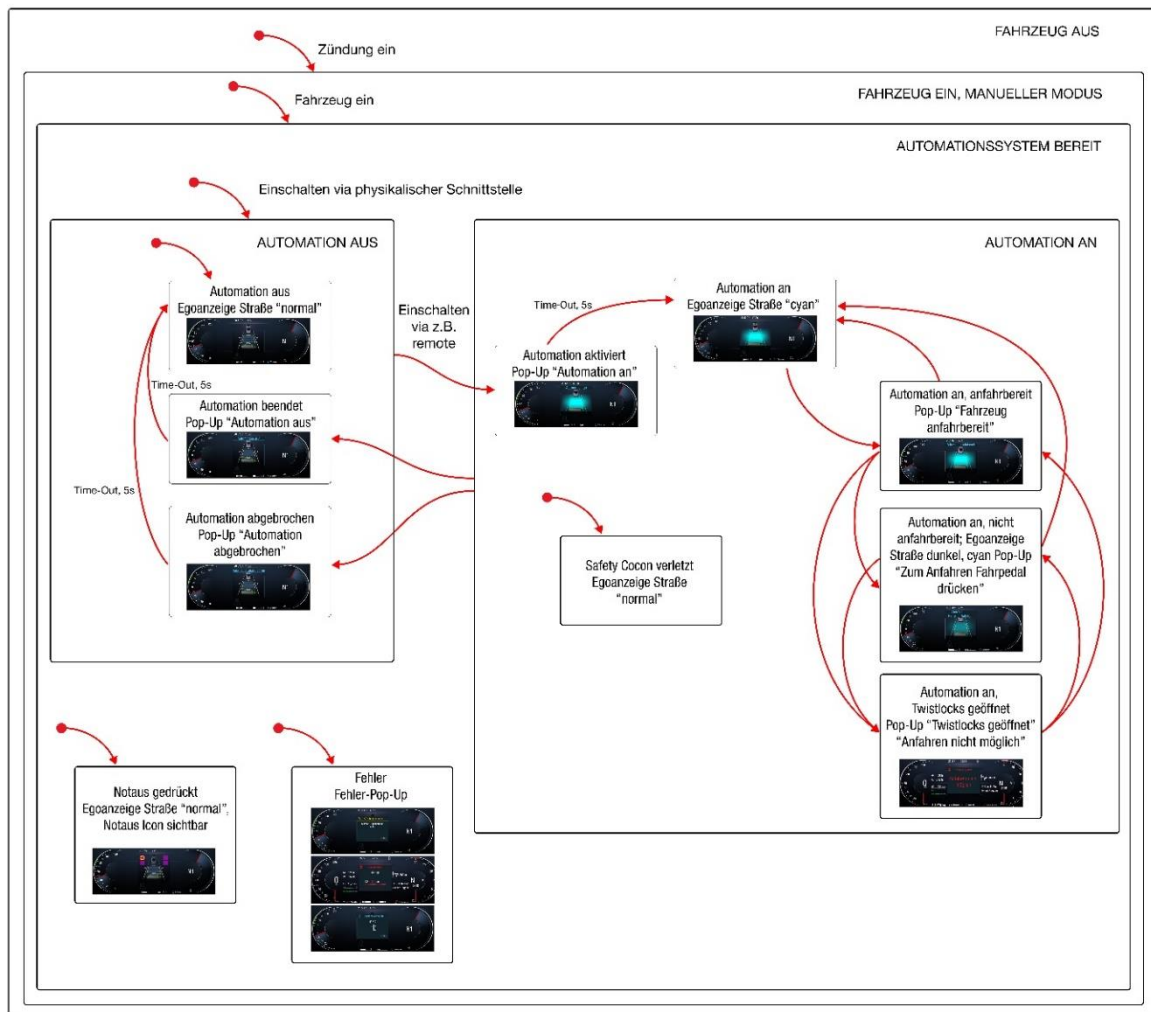


Abbildung 48: Schematische Darstellung des State-Chart für die Anzeigen im Kombi-Display für den Sicherheitsfahrer.

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 49). 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 50). 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 49: Links: Anzeige „Automation an“ im Cluster. Rechts: Anzeige „Automation aus“.



Abbildung 50: 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 51). 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.

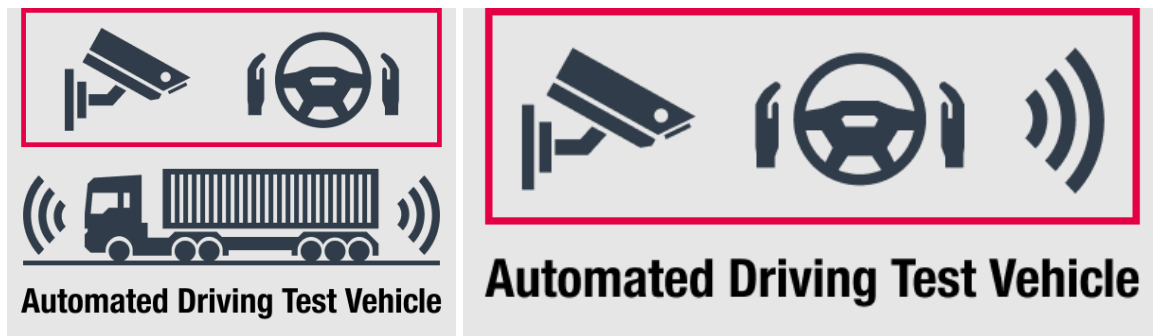


Abbildung 51: Links: Warnhinweis auf Schildern und Schulungsunterlagen. Rechts: Warnhinweis zur Anbringung am Fahrzeug.

Aufbau der Hardware am Fahrzeug

Für das externe HMI wurden Halterungen am Fahrzeug angebracht und daran Blitzleuchten und ein LED Streifen im Türgriff installiert. Verbau und Verkabelung erfolgte zusammen mit den Kollegen vom Fahrzeugaufbau. Die Verkabelung wurde in das Fahrzeug geführt und dort über CAN mit dem DDS-Gateway verbunden. Zur Ansteuerung mussten die Automatisierungssignale von DDS interpretiert und auf CAN ausgegeben werden. Um die Softwarelösung in Betrieb zu nehmen, erfolgten mehrere Testfahrten, in denen die Kommunikation zum Automatisierungssystem und zu den Blitzleuchten getestet wurde.

Auch das HMI für den Sicherheitsfahrer wurde in das Fahrzeug integriert. Dazu wurden entsprechende Anzeigen für das Clusterinstrument entwickelt. Das verwendete Cluster ist aus der MAN Serienentwicklung. Da die Anpassungen hierfür in der Serienentwicklung nicht vorgesehen waren, kam es zu Verzögerungen, da immer wieder Workarounds nötig waren. Der Vorteil der Lösung ist allerdings, dass dem Sicherheitsfahrer alle Informationen des Basisfahrzeugs, als auch der Automatisierungsfunktion zentral im Clusterinstrument angezeigt werden. Nach erfolgreicher Integration der Software auf dem Seriencluster wurde auch diese Anzeige bei Testfahrten, im Zusammenspiel mit dem Gesamtsystem, getestet.

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 schenkten, als dieser in der Ladeposition angekommen war. Von den Teilnehmern, die die cyan-farbigen 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. Verbesserungspotential 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 des 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 52). Diese diente dem Zusammenspiel des fahrzeuginternen Automatisierungssystems mit den terminalseitigen Logistiksystemen. Detaillierte Informationen zu der technischen Realisierung der Schnittstellen sind im Kapitel 3.3.2 zu finden.

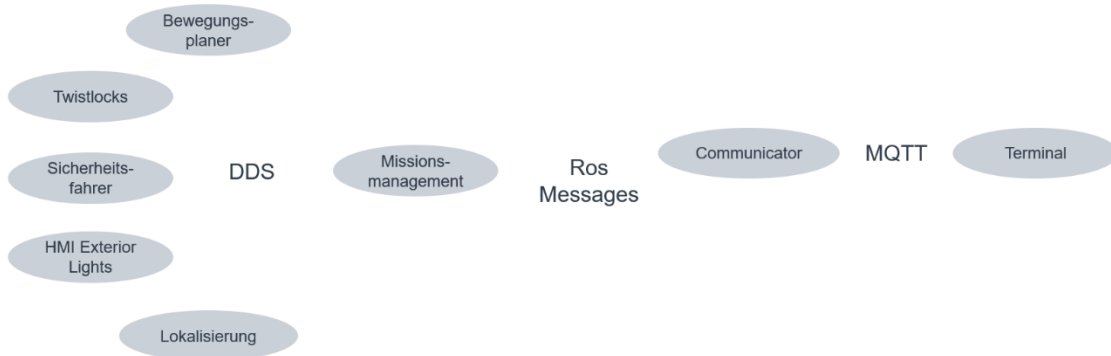


Abbildung 52: Schnittstellendesign (DDS, Message Queuing Telemetry Transport – MQTT).

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. Diese sind im Kapitel 3.3.2 beschrieben.

3.3.6 Lokalisierung des Sattelauflegers (AP 2.4)

Dieses Arbeitspaket betrifft die Funktion automatisiertes Auf- und Absatteln und wurde in den Kapiteln 3.3.1, 3.3.2 und 3.3.3 beschrieben. Für detaillierte Informationen wird zusätzlich an dieser Stelle auf den Bericht von Götting verwiesen.

3.3.7 Hinderniserkennung zur Kollisionsvermeidung (AP 2.5)

Die durchgeführten Arbeiten zu „Hinderniserkennung zur Kollisionsvermeidung“ wurden in den Kapiteln 3.3.1 und 3.3.4 beschrieben. Für detaillierte Informationen wird zusätzlich an dieser Stelle auf den Bericht von Götting verwiesen.

4 Entwicklung eines digitalen Kommunikationssystems (AP 3)

Dieses Arbeitspaket betrifft den Task Manager und wurde im Kapitel 3.3.2 beschrieben. Für detaillierte Informationen wird zusätzlich an dieser Stelle auf den Bericht von der Hochschule Fresenius verwiesen.

5 Durchführung der Testfahrten (AP 4)

Die folgenden Absätze sind teilweise aus dem ANITA Gemeinschaftsbericht entnommen.

Von Januar 2021 bis Ende 2022 fanden verschiedene Testfahrten in Ulm statt, um Daten für das Perception Modul zu sammeln und einzelne Softwarefunktionalitäten zu testen (siehe Abbildung 52). Aufgrund der Verzögerungen des Versuchsträgers, musste das Testkonzept geändert werden. Einzelne Softwarefunktionalitäten wurden mit einem älteren Fahrzeug vorgezogen, um Vorarbeit zu leisten und die Verzögerungen aufzuholen. Die Testfahrten mit dem ANITA Versuchsträger konnten im Januar 2023 starten und sind bis zum 01.09.2023 intensiv gelaufen. Im Laufe des Projekts sind Anpassungen hinsichtlich Testfahrten und Pilotphase durchgeführt worden. Zur Projektbeginn waren drei Testfahrten im Terminal vorgesehen. Danach sollte die Pilotphase starten. Alle Partner haben sich geeinigt, dass eine iterative Vorgehensweise bei den Tests im Terminal mehr Sinn machen würde. So konnten die verschiedenen Softwarestände im produktiven Umfeld regelmäßig getestet werden und ein schnelles Feedback an den Softwareentwickler gegeben werden. Dafür wurden deutlich mehr Testtage im Terminal durchgeführt, als ursprünglich geplant. Die Pilotphase erfolgte von 04.09.2023 bis zum 27.09.2023.

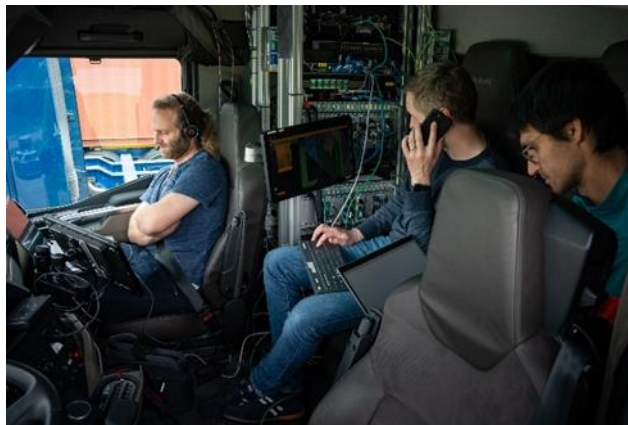


Abbildung 52: Auswertung von Testdaten an einem Testtag in Ulm.

5.1 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 in Kapitel 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.

5.2 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 Gefahren- und Risikoanalyse 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 weiterzuentwickeln. 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.

5.3 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 Terminal Operating Systeme (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 digitale Kommunikationssystem (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 53.

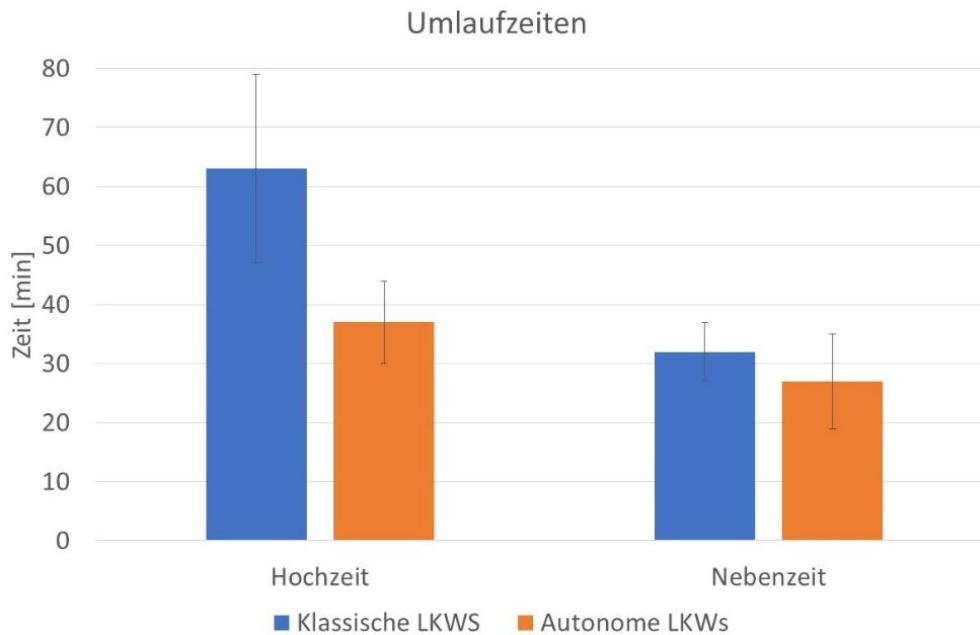


Abbildung 53: Mittlere Umlaufzeiten (Median) für Umfuhren klassischer LKW und autonomer LKW.

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 regulatorischer 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 Variationskoeffizient⁶ für die Vorhersage von Umläufen ohne digitale Unterstützung bei rd. 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.

5.4 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

⁶ Je niedriger desto besser

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 sinnvoller 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.

6 Validierung der Regelwerke (AP 5)

In diesem AP hatte MAN keinen Arbeitsumfang. Detaillierte Informationen können im partnerspezifischen Bericht der Hochschule Fresenius gefunden werden.

7 Systemsimulation und Transformation (AP 6)

In diesem AP hatte MAN keinen Arbeitsumfang. Detaillierte Informationen können im partnerspezifischen Bericht der Hochschule Fresenius gefunden werden.

8 Projektmanagement (AP 7)

Mit der Integration eines automatisierten LKW in den Logistikregelbetrieb und der ganzheitlichen systemischen Betrachtung stellte ANITA ein komplexes und technisch anspruchsvolles Projekt dar. Die Zielerreichung setzte eine koordinierte Zusammenarbeit aller Projektpartner untereinander sowie jeweils partnerintern voraus.

8.1 Konsortialprojektmanagement

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 54: 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/)⁷. 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 54 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.

8.2 Partnerinternes Projektmanagement

Das Arbeitspaket MAN-internes Projektmanagement umfasste sämtliche MAN-internen ANITA betreffenden Tätigkeiten der Projektorganisation, wie Ablauf- und Terminplanung, Risiko-, Kosten- und Qualitätsmanagement und Projektsteuerung.

Eine erfolgreiche Fahrzeugentwicklung besteht aus einer interdisziplinären Zusammenarbeit von Designern, Ingenieuren, Softwareentwicklern, Mechanikern und Elektrikern aus verschiedenen Abteilungen und Bereichen. Für die Projektorganisation wurde zwischen der Softwareentwicklung und dem fahrzeugseitigen Hardwareaufbau und -einbau unterschieden. Das Projektteam von ca. 40 Ingenieuren und Softwareentwicklern hat im Rahmen des Scale Agile Framework (SAFe) gearbeitet. Hierzu wurden die vorgesehenen Meetings (Sprint-Plannings, Retrospektiven, Reviews) vorbereitet und moderiert. Größere Arbeitsumfänge wurden in kleinere Arbeitspakete heruntergebrochen und an den jeweiligen Projektmitarbeiter adressiert.

Das Projekt ist am 01.07.2020 zu Beginn des Berichtszeitraums gestartet und die Arbeiten wurden aufgenommen. Die COVID-19-Pandemie und die damit einhergehenden Maßnahmen hatten Auswirkungen auf den Entwicklungsbetrieb bei MAN. Verschiebungen von Untersuchungen aufgrund eingeschränkter Reisemöglichkeiten, Verspätung der Erprobungsträgerlieferung aufgrund Komponentenknappheit, erforderten einen erhöhten organisatorischen und technischen Aufwand, um Lösungen zu erarbeiten und Verzögerungen zu mindern. Teilweise konnten Arbeitspakete, wie z. B. Basisfahrzeugschnittstellen oder Arbeiten zur Funktionalen Sicherheit, vorgezogen werden.

⁷ <https://www.anita.digital/de/homepage.html>

Dank der Umschichtung mancher Arbeitspakete und der Flexibilität der Projektpartner, konnten die Verzögerungen aufgeholt und alle Arbeitspakete erfolgreich abgeschlossen werden. Die Abbildung 55 zeigt den autonomen LKW bei einer Testfahrt im DUSS-Terminal.



Abbildung 55: Testfahrt im DUSS-Terminal.

8.3 Lessons Learned

Um die Erkenntnisse des Projekts ANITA zu sammeln und zu dokumentieren, wurden zwei Lessons Learned Workshops durchgeführt. Ein Workshop mit dem MAN Entwicklungsteam am 05.10.2024 und ein Workshop mit den Konsortialpartnern am 24.10.2024. Die Ergebnisse des Partnerworkshops sind im ANITA-Gemeinschaftsbericht dargestellt.

Im Laufe des MAN internen Workshops wurden folgende Fragen gestellt:

- Was hat gut funktioniert?
- Was hat schlecht funktioniert?
- Was würde ich nächstes Mal anders machen?

Alle Projektbeteiligten fanden, dass die Abschlusspräsentation, inklusive der Vorführung der Manöver automatisiertes Auf- und Absatteln, ein großer Erfolg war. Die Zusammenarbeit des Teams, vor allem am Ende des Projekts, wurde auch als sehr positiv empfunden. Die Entwicklungsarbeit in einem produktiven Umfeld war ein großes Mehrwert des Projekts. Damit konnten alle Projektbeteiligten einen besseren Überblick über die Bedürfnisse und Herausforderungen der anderen Projektpartner gewinnen und pragmatische Lösungen vorschlagen.

Die Verzögerung des ANITA-Versuchsträgers führte dazu, dass die Tests später als geplant begannen, was zu einem erhöhten Arbeitsaufwand für alle Projektbeteiligten führte, um die Zeitverzögerung aufzuholen. Es war nur ein Versuchsträger vorhanden, was ein großes Risiko im Projekt darstellte. Der automatisierte LKW stand zweimal aufgrund unvorhergesehener Ereignisse mehrere Wochen lang nicht zur Verfügung. Dies hatte direkte Konsequenzen auf den Terminplan, da das Entwicklungsteam für die geplanten Arbeiten auf keinen anderen Versuchsträger ausweichen konnte.

Die Verbesserungsvorschläge für zukünftigen Projekte sind wie folgt:

- Ein verbessertes Tracking der Schnittstellen zwischen den verschiedenen Arbeitspaketen, um Abhängigkeiten schneller zu identifizieren und gegen negativen Folgen wie z. B. Ressourcenverfügbarkeit zu handeln.
- Die Sicherstellung von zwei gleichen Erprobungsträgern, um Risiken eines Ausfalls zu minimieren.

9 Zielerreichung: Anpassungen und nachträgliche Betrachtung

Das übergeordnete Ziel von ANITA war die Integration eines autonomen LKWs in den Logistikablauf von DBIS und DUSS in Ulm. Wie in Kapitel 5 beschrieben ist dies im Lauf des Projektes erfolgreich gelungen. Zum Schluss der Pilotphase konnten bis zu 12 Missionen an einem Tag durchgeführt werden.

Um diese Ergebnisse zu erreichen, waren verschiedene Arten von Anpassungen notwendig:

- Änderungen der Zeitschiene und der Reihenfolge der Arbeitspakete: die COVID-19-Pandemie und die damit einhergehenden Maßnahmen hatten Auswirkungen auf den Entwicklungsbetrieb bei MAN. Die gravierendste Folge war die Verspätung des Versuchsträgers von einem Jahr. Der Start der Testfahrten und der Pilotphase mussten verschoben werden und manche Arbeitspakete, wie z. B. die Hinderniserkennung zur Kollisionsvermeidung, konnten erst viel später als ursprünglich geplant realisiert werden.
- Anpassungen an der Fahrzeugentwicklung: Ursprünglich war geplant, dass die Software Module von Götting in eine separate Hardware integriert werden sollte. Es hat sich im Lauf des Projekts aber als effizienter erwiesen, die Software auf einem MAN-Rechner zu installieren.
- Anpassungen an den Fahrzeuganforderungen: Für die Fahrzeugentwicklung stellte der Use Case im Projekt, in Bezug auf die dafür notwendigen Funktionalitäten, in mehrerer Hinsicht eine Herausforderung dar. Die engen Kurvenradien im Terminal und Depot erforderten eine sehr hohe Genauigkeit beim Regelwerk des Fahrzeugs. Das geringe Platzangebot, in Verbindung mit der Tatsache, dass auf engem Raum mit unvermittelt auftretenden Fußgängern zu rechnen war, war für die Funktionale Sicherheit sehr anspruchsvoll, um die angemessenen Sicherheitsabstände zu gewährleisten.
- Anpassungen am Logistikprozess: Bei DUSS und DBIS sind im Bereich der Anmeldung die LKW sehr nah aneinander geparkt. Die mögliche Anwesenheit von Personal oder LKW-Fahrern auf diesen Parkplätzen, erforderte geeignete Sicherheitsabstände, was aber mit den Anforderungen der engen Parkplätze in Widerspruch stand. Um den Sicherheitsabstand einhalten zu können, wurden dedizierte Parkplätze für die Anmeldung des autonomen LKW bei DUSS und DBIS vergeben.

Aus diesen Erkenntnissen lassen sich konkrete Vorschläge für die Gestaltung eines Containerterminals und zugehöriger Prozesse ableiten, um autonome Fahrzeuge möglichst einfach und performant integrieren zu können:

- Die Sicherheit der Menschen, die sich im Terminal befinden, ist der wichtigste Parameter für die Auslegung des autonomen Systems. Bei der Planung von zukünftigen Terminals müssen größere Kurvenradien vorgesehen werden, um

sicherzustellen, dass die notwendigen Sicherheitsabstände nicht mit den engen LKW-Manövern in Konflikt geraten.

- Jede Entscheidung, die der autonome LKW trifft, erfordert eine Rechenleistung. Deswegen ist eine übergeordnete Prozessintelligenz auf Terminalebene sinnvoll, um die Herausforderungen für das autonome System zu reduzieren. Dies würde klare Rahmenbedingungen für die Funktionen gewährleisten und so insgesamt einen effizienteren Ablauf sicherstellen.

Aktuell nutzen Terminals verschiedene Systeme um ihren Logistikprozess durchzuführen, wodurch keine Standards für die Schnittstellen existieren, die für den Missionsablauf notwendig sind. Eine Anpassung der fahrzeugseitigen Missionsplanung an neue spezifische Umstände ist möglich, aber aufwendig und nicht im Sinne einer übergeordneten Hub-to-Hub-Applikation. Deswegen wäre die Bearbeitung von Standards für die Schnittstellen zwischen den verschiedenen Beteiligten im Logistikprozess sinnvoll, um die Integration von autonomen Fahrzeugen schneller voranzubringen.

10 Zahlenmäßiger Nachweis: wichtigste Positionen

Im Projekt ANITA wurden ca. 8 % des Gesamtbudgets für den Prototypaufbau und die Inbetriebnahme verwendet. Etwa 6 % des Budgets wurden für Forschungsarbeiten in Rahmen von Promotionen aufgewendet. Der größte Aufwand des Projekts war die Entwicklungsarbeit, die ca. 86 % der Gesamtausgaben darstellte.

11 Schlusswort

Das Projekt ANITA startete am 01.07.2020 und wurde am 30.09.2024 erfolgreich abgeschlossen. Trotz ungeplanten Ereignissen konnte das Konsortium von ANITA die Projektziele erreichen und hat sehr positive und wichtige Ergebnisse für die Zukunft des autonomen Fahrens generiert. Mit den Lessons Learned, die in Kapitel 5.4 und 8.3 zu finden sind, wurden wertvolle Erkenntnisse aus dem Projekt gewonnen, die in zukünftigen Projekten genutzt werden können.

Die MAN Truck & Bus SE möchte sich beim Fördermittelgeber, dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, für das Vertrauen bedanken. Die hervorragende Betreuung von der TÜV Rheinland Consulting GmbH als Projektträger während des gesamten Projekts war sehr hilfreich. MAN ist für Ihr Engagement und Ihre Ratschläge sehr dankbar. Die Zusammenarbeit im Konsortium war ausgezeichnet. Gemeinsam konnten die Projektpartner großartige Ergebnisse erzielen. Vielen Dank für das Engagement und die Professionalität.

Literaturverzeichnis

BGHW Spezial (2017). *Betrieb von fahrerlosen Flurförderfahrzeugen – Personenschutz durch Erkennungssysteme*, https://kompendium.bghw.de/bghw/xhtml/document.jsf?alias=bghw_sw_b12sw20_1_&&event=navigation

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>.

SAE International (31.05.2019). *Automated Driving System (ADS) Marker Lamp (SAE J 3134)*.

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

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

Werling, M. (2014). *Ein neues Konzept für die Trajektoriengenerierung und -stabilisierung in zeitkritischen Verkehrsszenarien*. (Vol. 34). KIT Scientific Publishing.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Projekt ANITA: MAN partnerspezifischer Schlussbericht	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Jacquemart-Purson, Amélie Gebauer, Oliver Harsandi, Veronika Jürgens, Stefan Kuttenreich, Fabian Lippert, Lars Rother, Liesa Strauss, Peter Troberg, Sonja Wölfel, Christiane Wulf, Leonie	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	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 19A20006 A
	11. Seitenzahl 95
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 6 Angaben
	14. Tabellen 4 Tabellen
	15. Abbildungen 55 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 MAN partnerspezifischen 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 automatisieren 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: MAN Final Report	
4. author(s) (family name, first name(s)) Jacquemart-Purson, Amélie Gebauer, Oliver Harsandi, Veronika Jürgens, Stefan Kuttenreich, Fabian Lippert, Lars Rother, Liesa Strauss, Peter Troberg, Sonja Wölfel, Christiane Wulf, Leonie	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	9. originator's report no.
	10. reference no. 19A20006 A
	11. no. of pages 95
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references 6 references
	14. no. of tables 4 tables
	15. no. of figures 55 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 MAN final project report. The main goals of ANITA were: <ul style="list-style-type: none"> - 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