Partnerspezifischer Schlussbericht

Berichtszeitraum: 01.07.2022 - 30.06.2025

Altair Engineering GmbH

Vorhabenbezeichnung	Digital OTA Connectivity Twin (DOCT)
Version	1.0
Projektkoordination	Mercedes-Benz AG
Fälligkeit	31.12.2025
Erstellungsdatum	11.12.2025
Veröffentlichung	11.12.2025

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben DOCT wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie und der Europäischen Union unter dem **Förderkennzeichen 19A22001A** gefördert.

Finanziert von der Europäischen Union
NextGenerationEU

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Dokumenteninformation

Autoren

Thomas Hager – Altair
Sebastian Senninger - Altair

Kontakt

Thomas Hager
Altair Engineering GmbH
Calwer Str. 7
71034 Böblingen
Deutschland

Tel: +49 151 175 297 03
Email: hager@altair.com
Projektwebsite: www.doct-projekt.de

Inhaltsverzeichnis

Partnerspezifischer Schlussbericht i

1 Übersicht 1

1.1 Aufgabenstellung 1

1.2 Vorrausetzungen für das Vorhaben 2

1.3 Planung und Ablauf 5

1.4 Stand von Wissenschaft und Technik 6

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 6

2 Eingehende Darstellung 7

2.1 Erzielte Ergebnisse 7

2.1.1 Wichtigste Ergebnisse und Ereignisse 7

2.1.2 Projektumsetzung im Vergleich zur VHB 7

2.1.3 UAP6.1 Definition der Ziele, Schnittstellen und Datenstrukturen des Digital Twin 7

UAP6.2 KI-Modelle und Workflows für Digital Twin 8

2.1.4 UAP6.3 Implementation KI-Modelle im Digital Twin 21

2.2 Zahlenmäßiger Nachweis 24

2.3 Notwendigkeit der Förderung 24

2.4 Nutzen und Verwertbarkeit 24

2.5 Fortschritte Dritter im Forschungsgebiet 24

2.6 Veröffentlichungen 25

3 Literaturverzeichnis 26

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Simulationsstrecke Bebenhausen 3

Abbildung 2: Raytracing-Simulation mit Mehrwegeausbreitung und Feldstärken für klassisches Szenario 4

Abbildung 3: Raytracing-Simulation mit Mehrwegeausbreitung für dynamisches Szenario 4

Abbildung 4: Raytracing Simulation mit Mehrwegeausbreitung in Tunnel 5

Abbildung 5: Virtuelle Welt in WinProp. 8

Abbildung 6: Validierung der Simulationsergebnisse anhand der PCI 159 in Rosenheim. 9

Abbildung 7: Validierung der Simulationsergebnisse anhand der PCI 309 in Immendingen. 10

Abbildung 8: Validierung der Simulationsergebnisse anhand der Channel Sounding Messungen in Ilmenau. Vergleiche zwischen Messung und Simulation basierend auf dem Power-Delay-Profil. 11

Abbildung 9: Validierung der Simulationsergebnisse anhand der Channel Sounding Messungen in Ilmenau. Vergleiche zwischen Messung und Simulation basierend auf dem Empfangswinkel. 11

Abbildung 10: Darstellung der verglichenen Strahlwege in ProMan für eine Position in Ilmenau. 12

Abbildung 11: Korrelationsmatrix der gemessenen Daten einer Rosenheim Messfahrt. 13

Abbildung 12: Vergleich des Handoververhaltens zwischen den Messkampagnen in Rosenheim durchgeführt im Juli 2023 (oben) und Februar 2024 (unten). 14

Abbildung 13: Draufsicht der Zellzuweisung ohne (link) und mit (rechts) Handoverparameter. 15

Abbildung 14: Verlauf der Zellzuweisung ohne (orange) und mit (blau) Handoverparameter. 15

Abbildung 15: Vergleich der Cluster Algorithmen k-Means und DBSCAN. 16

Abbildung 16: Beispiel der Hauptkomponenten eines Messdatensatzes von Rosenheim der PCI 166, die verwendeten Parameter sind RSRP, RSRQ, Rang und die gefahrene Distanz. 17

Abbildung 17: Clustering Ergebnisse und Reduzierung des Datensatzes basierend auf den Cluster Zentren, dargestellt anhand des gemessenen RSRP gegenüber der gefahrenen Strecke. 17

Abbildung 18: Clustering Ergebnisse und Reduzierung des Datensatzes basierend auf den Cluster Zentren, dargestellt anhand der PCA des Datensatzes. 18

Abbildung 19: Clustering Ergebnisse und Reduzierung des Datensatzes basierend auf dem nächstgelegenen Punkt, dargestellt anhand des gemessenen RSRP gegenüber der gefahrenen Strecke. 18

Abbildung 20: Clustering Ergebnisse und Reduzierung des Datensatzes basierend auf dem nächstgelegenen Punkt, dargestellt anhand der PCA des Datensatzes. 19

Abbildung 21: Clustering Ergebnisse und Reduzierung jeden zweiten Punktes des Datensatzes, dargestellt anhand des gemessenen RSRP gegenüber der gefahrenen Strecke. 19

Abbildung 22: Clustering Ergebnisse und Reduzierung jeden zweiten Punktes des Datensatzes, dargestellt anhand der PCA des Datensatzes. 19

Abbildung 23: Vergleich der Reduzierungsalgorithmen, basierend auf der cumulative density function (CDF) von RSRP und Throughput. 20

Abbildung 24: Implementierungsstruktur des Digital Twin. 21

Abbildung 25: Darstellung der Vielfalt an Analysemöglichkeiten mithilfe der Panopticon Implementierung. 22

Abbildung 26: Statistischer Vergleich zweier Antennenkonfigurationen in Altair Panopticon. 23

Abbildung 27: Vergleich zweier Antennenkonfigurationen in Altair Panopticon. 23

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Reduktionsmethoden hinsichtlich der reduzierten Datenpunkte. (a) steht für die Methode basierend auf dem Cluster Zentrum, (b) für das Verfahren beruhend auf der geringsten Distanz und (c) die Reduzierung jedes zweiten Punktes. 20

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
2FA	Sicherheitsaspekte wie eine Zwei-Faktor-Authentifizierung
AI	Artificial Intelligence
API	Application Programming Interface
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CDF	Cumulative Density Function
DBSCAN	Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise
DAB	Digital-Audio-Broadcast
EWR	Europäischer Wirtschaftsraum
GMM	Gaussian Mixture Models
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
KI	Künstliche Intelligenz
KPI	Key Performance Indicator
LOS	Line-of-Sight
LSTM	Long Short-Term Memory
ML	Maschinelles Lernen
MIMO	Multiple Input Multiple Output
NN	Neural Network
OTA	Over-the-Air
PCA	Principal Component Analysis (Hauptkomponentenanalyse)
PCI	Physical Cell Identity
REST	Representational State Transfer
RSRP	Reference Signal Received Power

Abkürzung	Bedeutung
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
TCU	Telematic-Control-Unit
TF	Transfer Learning

1 Übersicht

1.1 Aufgabenstellung

Hauptziel des Projektvorhabens DOCT (Digital OTA Connectivity Twin) ist eine signifikante Steigerung der Systemabsicherung durch erweiterte, standardisierte Testszenarien für Fahrzeuge. Die dabei entstehenden Bewertungsergebnisse sollen aussagekräftiger und sicherer gemacht, und mittels digitalen Zwillings (Digital Twin) soll der Entwicklungszyklus von Connectivity-Systemen im Fahrzeug beschleunigt werden. Diese Ergebnisse sollen in Zukunft für die Zertifizierung für vernetzte automatisierte Fahrzeuge verwendet werden.

Durch den Einsatz KI-basierter Simulations- und Emulationsmethoden wird ein digitaler Zwilling (Digital Twin) entwickelt, der die reale Funkumgebung widerspiegelt und die Komplexität der Funkbedingungen auf ein notwendiges Maß reduziert. Dies führt zu einer Verkürzung der Entwicklungszeiten, erweitert wesentlich die digitale Funktionsabsicherung und macht diese einem größeren Anwenderkreis zugänglich. Durch den Einsatz der im Rahmen von DOCT entwickelten Methoden und Testaufbauten können langfristig Entwicklungszeiten verkürzt, weltweite Testfahrten reduziert und die Entwicklungstiefe erhöht werden. Zusätzlich zu dem KI-Ansatz sind hierzu die Weiterentwicklung von Simulations- und Emulationsmethoden, als auch der messtechnischen Erfassung der Vielzahl verschiedener Funkszenarien im realen Feld notwendig.

Aktuelle Methoden der Fahrzeugentwicklung spezifizieren lediglich Basisparameter des Connectivity-Systems wie Richtcharakteristiken der Fahrzeugantennen, Kabeldämpfungen und grundlegenden Telematic-Control-Unit (TCU)-Eigenschaften. Diese müssen zukünftig um weitere Parameter der Sicherheit und Robustheit ergänzt werden, um den kommenden Anforderungen gerecht zu werden.

Während des Entwicklungszyklus gibt es üblicherweise zwei Arten von Tests:

- Komponententests: Hierbei werden Einzelkomponenten des Gesamtsystems üblicherweise im kabelgebundenen Test untersucht. Dabei kommen unter anderem standardisierte stochastische Funkkanalmodelle wie WINNER oder QUADRIGA zum Einsatz (Schirmer, 2018) (WINNER II interim channel models, 2006)
- Feldtests: Hier wird das Gesamtfahrzeug exemplarisch weltweit auf wenigen Strecken getestet, auf denen kritische Abschnitte identifiziert wurden, beispielsweise Telefonat-Abbrüche oder Probleme durch starke Sendeanlagen in der Umgebung

Generell können Feldtests aus Gründen des zeitlichen und finanziellen Aufwandes nur an ausgewählten Strecken stattfinden. So werden aktuell zum Beispiel Fahrzeuge in die Kundenländer (Japan, USA, Südkorea) überführt, um sie dort auf einzelnen Strecken zu testen. Mit der Strecke ist auch die Wahl der dort unterstützten länderspezifischen Frequenzbänder limitiert. Außerdem ist durch ständig wechselnde Umgebungseigenschaften wie Wetter (Regen/Schnee), Blattwerk, Funkzellenauslastung und andere Verkehrsteilnehmer (Abschattungen und Reflektionen) eine reproduzierbare Bewertung unterschiedlicher Entwicklungsstadien nicht möglich.

Durch diese vielen Einflüsse, zu denen auch die Umgebung (Stadt, Land, Wald, Küste), externe Störquellen und die Netztopologie inklusive dynamischer Netzorganisation zählen, ergibt sich ein hochdimensionales Gebilde an möglichen praktischen Szenarien. Der vollständige Test ist unmöglich, nicht wirtschaftlich und im Normalfall nicht notwendig. Jedoch muss sichergestellt sein, dass der Test des Fahrzeugkommunikationssystems alle relevanten und kritischen Szenarien abdeckt, um die Funktionalität des Systems in Hinblick auf die zum Teil sicherheitskritischen Anwendungsfälle zu gewährleisten. Wenn der Kunde einen Fehler feststellt, ist das im Falle von Rundfunkempfang lediglich ärgerlich und schädigt die Kundenzufriedenheit, bei sicherheitsrelevanten Features kann jedoch die Gesundheit der Verkehrsteilnehmer gefährdet sein oder der Verkehrsfluss eines automatisierten Verkehrssystems zusammenbrechen.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass es bis heute nicht möglich ist, ein Fahrzeug vollumfänglich zu testen, da keine umfassenden Funk- und Umgebungsszenarien für den Test vorhanden sind. Die existierenden Szenarien sind für die Absicherung zukünftiger Anwendungen bei Weitem nicht ausreichend.

Durch eine Verlagerung des Testprozesses von der Straße (Feldtests) fast vollständig hin zu Simulation und Connectivity-Systemtests in der Messhalle, wird ein Beitrag zur Reduktion von Kosten und nebenbei auch von CO2-Emmissionen und damit zu den Klimazielen geleistet. Durch die Absicherung des vernetzten Fahrens wird ein sicherer und effizienter Verkehrsfluss ermöglicht, somit können unnötige Beschleunigungs- und Bremsmanöver, sowie Staus vermieden werden.

Ein weiteres wichtiges Ziel ist die Optimierung des Connectivity-Gesamtsystems auf eine robuste Verbindung und entsprechend der Umgebungs-, Stör- und Netzwerkbedingungen höchstmögliche Datenraten.

Für die Zielerreichung werden Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) und des maschinellen Lernens (ML) zum Einsatz kommen. Mithilfe dieser Methoden kann die unüberschaubare Anzahl an Funkszenarien mit den zugehörigen Key Performance Indikatoren (KPI) und Metadaten der kritischen Bereiche im ersten Schritt erfasst und vereinfacht werden. Im zweiten optionalen Schritt soll es mittels Transfer Learnings (TL) möglich sein, die erfassten Szenarien zu adaptieren und zu vervollständigen, wie zum Beispiel auf unterschiedliche Frequenzbänder und Umgebungsbedingungen, sowie der räumlichen und richtungsgebundenen Ausbreitung der Funksignale. Die so erzeugten Funkumgebungsszenarien bilden die Basis des Digital Twin, also ein realistisches digitales Abbild der Funkwelt. Zwei verschiedene Teststrategien sollen darauf aufbauen:

- OTA (Over-the-Air) nach dem Radiated Two Stage Verfahren
- Kabelgebunden nach dem Conducted Two Stage Verfahren

1.2 Vorrausetzungen für das Vorhaben

Das zentrale Ziel im DOCT-Projekt war der Test der Fahrzeugkommunikationssysteme in einer synthetischen, unter Laborbedingungen reproduzierbar, bereitgestellten Umgebung. Die wesentliche Anforderung an diese virtuelle Umgebung ist dabei die Realitätsnähe.

Realitätsnähe bedeutet dabei, dass die Signalstärke und die Richtung, und im Falle von Mehrwegeausbreitung auch die relative Verzögerung (und der daraus resultierenden Dopplerfrequenzen) der einzelnen einfallenden elektromagnetischen Wellen identisch zu einem realen System, dargestellt werden. Die einzelnen elektromagnetischen Wellen können dabei sowohl primäre Nutzsignale (aktive Basisstation), sekundäre Nutzsignale (Nachbarbasisstationen) als auch Störsignale sein.

Obwohl Simulationen nie vollständig die Realität abbilden, da diese Abstraktionen der realen Welt darstellen, können sie gut zur verallgemeinerten Datenbereitstellung dienen. Das bedeutet, dass zum Beispiel eine Messstrecke, die nur auf einem bestimmten Frequenzband vermessen wurde, mit Hilfe von Simulation und entsprechenden Funkausbreitungsparametern für Luft, Oberflächen und Materialien, Messdaten für weitere Frequenzbänder generieren kann. Auf diese Weise kann das Funkkanalportfolio, wie es in diesem Projekt benötigt wird und erzeugt werden soll, vervollständigt werden.

Erste Simulationen für virtuelle Testfahrten haben schon im Jahr 2009 für eine Messstrecke zwischen Böblingen und Tübingen (Bebenhausen) bei Altair in Kooperation mit Mercedes-Benz stattgefunden, die Simulationsstrecke ist dargestellt in Abbildung 1. Die simulierte Funktechnologie war Digital-Audio-Broadcast (DAB) und die Herausforderungen bei Rundfunkdiensten ist die einseitige Kommunikationsrichtung mit hohen Sendepositionen und hohen Abstrahlleistungen. Dabei werden sehr hohe Versorgungsgebiete erreicht und dementsprechend groß müssen die Simulationsgebiete definiert werden, je nach Lage der zu simulierenden Testfahrt. (T. Rautiainen, 2002)

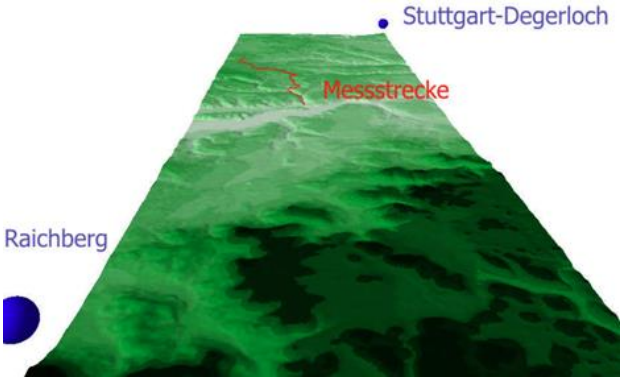

Abbildung 1: Simulationsstrecke Bebenhausen

Im Laufe der Jahre hat sich das Portfolio an Szenarien stark erweitert, insbesondere hin zu Untersuchungen von LTE und 5G. Die Szenarien, auf die zurückgegriffen werden kann, sind Böblingen-Hulb, ein Autobahnabschnitt der A81 zwischen Sindelfingen und Böblingen, Ehningen, Ilmenau, Rosenheim und Stuttgart. Im Laufe des Vorhabens wurden vorhandene Szenarien durch aktuelle Datensätze für Topografie und Gebäudedaten aktualisiert.

Die Schwierigkeit bei Aufbau und Definition solcher Szenarien besteht in der Verfügbarkeit und Genauigkeit von Gebäudedaten, Topografie und Netzinformationen der unterschiedlichen Netzbetreiber, um eine hinreichend genaue Simulation der virtuellen Testfahrten zu prognostizieren.

Die Simulation der Wellenausbreitung mittels Raytracing berücksichtigt sowohl die Topografie als auch die Gebäudedaten und bestimmt frequenzabhängig die Mehrwegeausbreitung zwischen Sender und Empfänger. Dabei können die Bewegungsprofile von Sender als auch Empfänger beliebig konfiguriert werden. Sowohl klassische Szenarien (Abbildung 2), Szenarien mit bewegtem Empfänger (Auto) und mit statischem Sender (Basisstation) als auch dynamische Szenarien (Abbildung 3) mit bewegtem Empfänger und Sender (Auto zu Auto) können betrachtet werden.

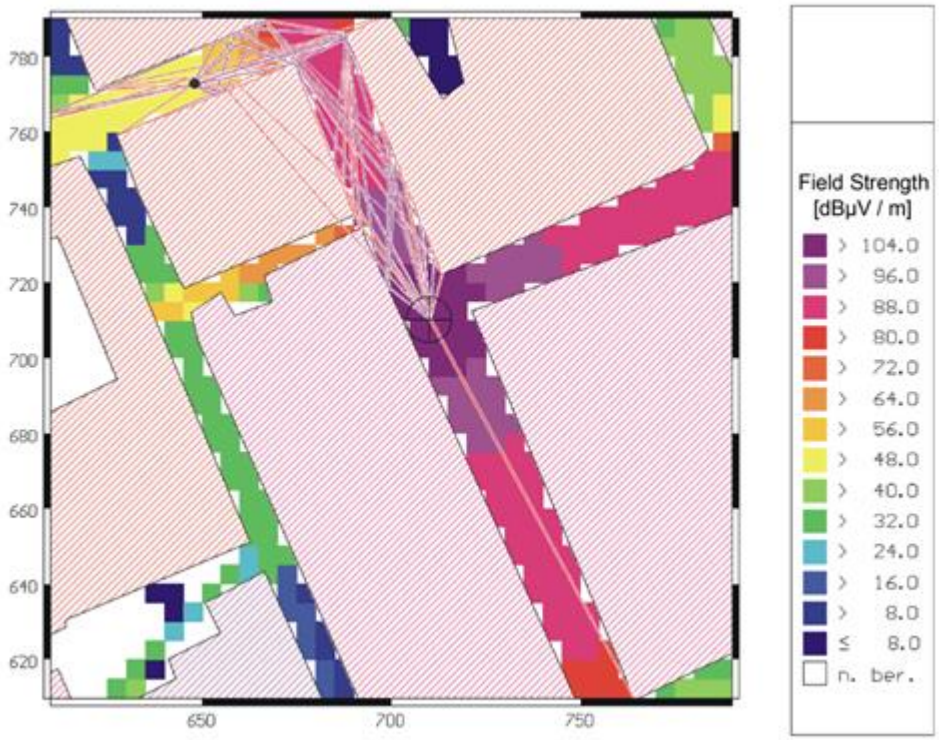

Abbildung 2: Raytracing-Simulation mit Mehrwegeausbreitung und Feldstärken für klassisches Szenario

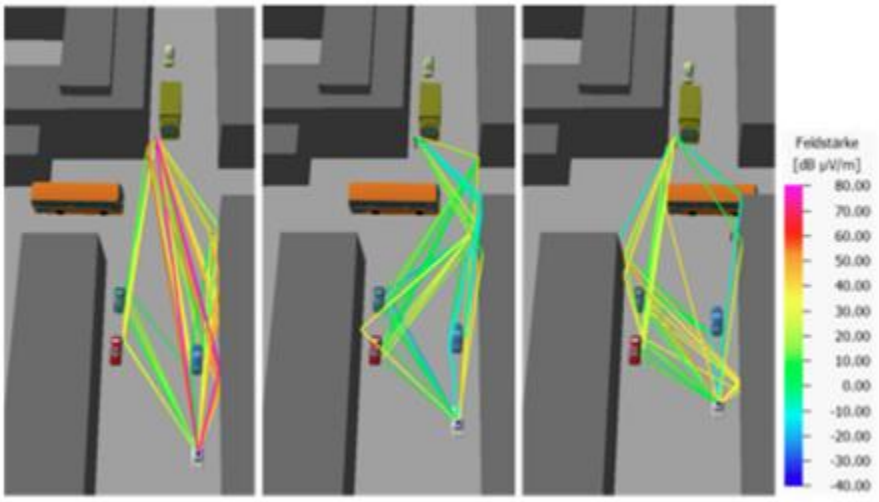

Abbildung 3: Raytracing-Simulation mit Mehrwegeausbreitung für dynamisches Szenario

Aber auch komplexere Szenarien wie z.B. Simulationen in Tunneln (Abbildung 4) können modelliert und prognostiziert werden.

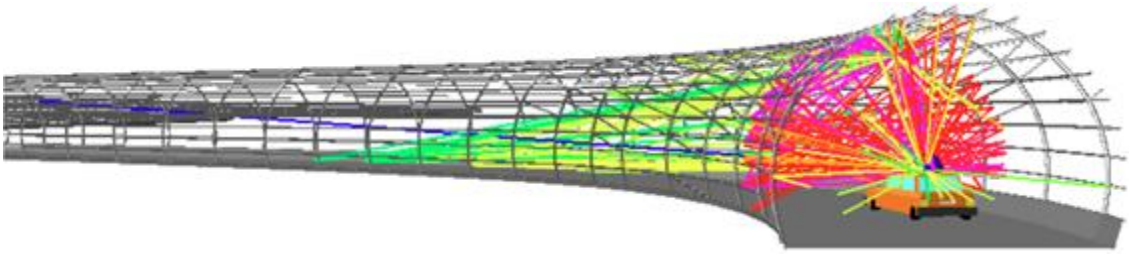

Abbildung 4: Raytracing Simulation mit Mehrwegeausbreitung in Tunnel

1.3 Planung und Ablauf

Das Konsortium des Verbundvorhabens DOCT bestand aus Partnern unterschiedlicher Spezialisierung und war auch im Personal interdisziplinär zusammengesetzt. Partner waren die Mercedes-Benz AG (Konsortialführer), Continental Advanced Antenna GmbH, Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., IMST GmbH, Keysight Technolgies Deutschland GmbH und Rohde & Schwarz GmbH & CO. KG. Assoziierte Partner, Unterauftragnehmer oder ein projektbegleitender Ausschuss waren nicht beteiligt.

Durch die Zusammensetzung der individuellen Kompetenzen konnte von der Entwicklung des Gesamtsystems, über die Bereitstellung der notwendigen Hardware und Integration bis hin zur Inbetriebnahme und Validierung in der Antennenmesshalle von Mercedes-Benz die komplette Wertschöpfungskette durch das Konsortium abgedeckt und mittels hoher Kompetenz der beteiligten Partner wegweisende Fortschritte im Bereich der Systemabsicherung von Connectivity Systemen in Fahrzeugen erlangt werden.

Die einzelnen Arbeitspakete und eine definierte Verteilung der Verantwortlichkeiten ergaben sich durch die Kompetenzfelder der jeweiligen Projektpartner. Das Verbundvorhaben wurde in Hauptarbeitspaketen strukturiert, wobei wichtige Zwischenergebnisse durch Meilensteine abgeschlossen wurden.

Das Vorhaben war entlang folgender Arbeitspakete organisiert:

- AP1: Beobachtung Technologietrends (Leitung: Rohde & Schwarz)
- AP2: Beschreibung der KPIs (Leitung: Continental)
- AP3: Gewinnung von Funkszenarien (Leitung: Fraunhofer IIS)
- AP4: Reduzierung der Testkomplexität (Leitung: Fraunhofer IIS)
- AP5: Entwicklung von KI-Verfahren (Leitung: IMST)
- AP6: Konzeption des Digital Twin (Leitung: Altair)
- AP7: Aufbau des Proof-of-Concept (Leitung: Mercedes-Benz)
- AP8: Projektkoordination & Ergebnisverbreitung (Leitung: Mercedes-Benz)

Die Zusammenarbeit zwischen den Partnern gestaltete sich konstruktiv, wurde durch regelmäßige Telefonkonferenzen und Projekttreffen unterstützt und erlangte durch die vorliegende Konstellation eine hervorzuhebende Qualität, die sich in der Demonstration der entwickelten Technologien zeigt. Durch die hervorragende Zusammenarbeit der Projektpartner konnte das Projekt bis zum Abschluss ohne inhaltliche Qualitätseinbußen durchgeführt werden. Die Projektlaufzeit wurde vom 01.07.2022-30.06.2025 geplant und durchgeführt.

1.4 Stand von Wissenschaft und Technik

Der Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich der virtuellen Testfahrten hat sich in den letzten Jahren rasant weiterentwickelt. Simulationen dienen dazu, Messdaten in verschiedenen Frequenzbändern zu ergänzen und eine verallgemeinerte Datenbasis zu schaffen. Erste Simulationen fanden bereits 2009 in Kooperation zwischen Altair und Mercedes-Benz statt, wobei sich das Portfolio an Szenarien seither stark erweitert hat, insbesondere in Bezug auf LTE und 5G. Eine Herausforderung bei diesen Simulationen ist die Verfügbarkeit und Genauigkeit von Gebäudedaten, Topografie und Netzinformationen. Raytracing wird verwendet, um die Mehrwegeausbreitung zwischen Sender und Empfänger frequenzabhängig zu bestimmen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während des Vorhabens fand die Zusammenarbeit auf Ebene des Konsortiums statt.

EICT GmbH (Projektmanagement-Dienstleister) unterstützte die operative Koordination des Projekts und übernahm sowohl die interne als auch die externe Kommunikation. Die Einbindung erfolgte im Rahmen eines gemeinsamen Unterauftrags (GUA), der von allen Projektpartnern gemeinsam vergeben wurde. Die von EICT erbrachten Leistungen gliederten sich in zwei Bereiche: die Aufgaben des Projektmanagements und der Koordination, und die Maßnahmen zur Projektkommunikation.

Eine darüberhinausgehende Zusammenarbeit mit anderen Stellen wurde auf Grund der vollständigen Abdeckung der Aktivitäten durch das Konsortium nicht notwendig.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse

Nachfolgend werden die erreichten Resultate von Altair innerhalb der definierten Arbeitspakete umfassend dargestellt und die spezifischen Beiträge in den jeweiligen APs beleuchtet.

2.1.1 Wichtigste Ergebnisse und Ereignisse

Ein Kernelement des Konzepts des Digitalen Zwillings beruht auf Raytracing Simulationen. Innerhalb des AP6 war daher die Kalibrierung und Validierung der Simulationen ein wichtiger Punkt. Hierbei zeigte Altair, dass es möglich ist, mithilfe eines Optimierungsalgorithmus Umgebungs- und Ausbreitungsparameter der Simulationen entsprechend den Messergebnissen anzupassen. Dieses Vorgehen führt zu Ergebnissen, welche mit dem realen OTA-Kanal vergleichbar sind.

Damit einhergehend entwickelte Altair ein Konzept beginnend mit Ergebnissen der Messfahrten, welches eine komplette Kette über Simulation und Emulation bis hin zur effizienten Auswertung und Bewertung erlaubt.

2.1.2 Projektumsetzung im Vergleich zur VHB

Das Teilarbeitspaket AP6 wurde ohne Abweichungen zur VHB umgesetzt.

2.1.3 UAP6.1 Definition der Ziele, Schnittstellen und Datenstrukturen des Digital Twin

- Innerhalb des Projekts wurden drei zentrale Ziele für das AP6 festgelegt. Ersteres ist ein Workflow zur Verarbeitung, Analyse und Aufbereitung von OTA-Daten aus verschiedenen Datenquellen. Außerdem soll der Digital Twin ein Verfahren zum Clustering der OTA-Daten mit dem Ziel einer reduzierten Emulationszeit bereitstellen. Zu diesem Zweck wurden die Algorithmen k-Means, DBSCAN und „Gaussian Mixture“ Models getestet. Als letztes Ziel ist die Handover Analyse anzuführen, um diese realistisch in Simulation und Emulation nachstellen zu können. Dies wurde mit einem neuronalen Netz vom Typ „Long Short-Term Memory Neural Network“ (LSTM NN) umgesetzt.

- Folgende Datenquellen wurden in Betracht gezogen, Messungen mit ROMES (Rohde&Schwarz) und NEMO (Keysight) als ASCII Exporte, Channel Sounding Messergebnisse (Fraunhofer IIS) und Simulationsergebnisse (Altair). ROMES bietet die Möglichkeit ASCII Exporte von Netzwerk-Scanner und UE basierten Messungen, durchgeführt mit Hardware, zu erstellen. Gleiches gilt hinsichtlich NEMO für Messausrüstung von Keysight. Diese Datensätze enthalten ausschließlich Informationen bezüglich RSRP, RSRQ, SINR, RSSI, Throughput (Datenrate) und MIMO-Rang, nicht jedoch über die Mehrwegeausbreitung.

- Des Weiteren muss der Digital Twin in der Lage sein, Ergebnisse der Channel Sounding Messungen des Fraunhofer Institut IIS zu verarbeiten. Diese enthalten nur Angaben zur Mehrwegeausbreitung, allerdings nicht über oben genannte KPIs.

- Zuletzt muss eine Schnittstelle zu den Simulationsergebnissen, durchgeführt mit Altair WinProp, bestehen. Diese sind flexibel hinsichtlich der Ausgabeparameter und decken alle relevanten KPIs ab.

UAP6.2 KI-Modelle und Workflows für Digital Twin

Im Rahmen des UAP6.2 wurden Virtuelle OTA-Modelle der gemessenen Szenarien in Rosenheim, Immendingen, Ehningen und Ilmenau in WinProp erstellt. Außerdem wurde ein rein virtuelles Szenario eines Kommunikationsnetzes in Manhattan, New York (USA) erstellt. Hierfür wurden Informationen der Topologie (Geländemodell), der Vegetation und der Gebäude gesammelt. Außerdem wurden gemessene Antennenpattern (Fernfeld Richtcharakteristik) des UEs als auch existierende von den jeweiligen Antennen-Herstellern für die Basisstationen verwendet. Zuletzt flossen auch Informationen über das jeweilige Netzwerk (bereitgestellt durch den jeweiligen Mobilfunkbetreiber), wie die Sektorkonfigurationen, eingesetzte Frequenzbänder und Trägerfrequenzen, Modulationsschemata und die Leistungsparameter, in die Simulationsprojekte ein. In Abbildung 5 sind die verschiedenen Inputparameter zur Erzeugung der virtuellen Welt dargestellt.

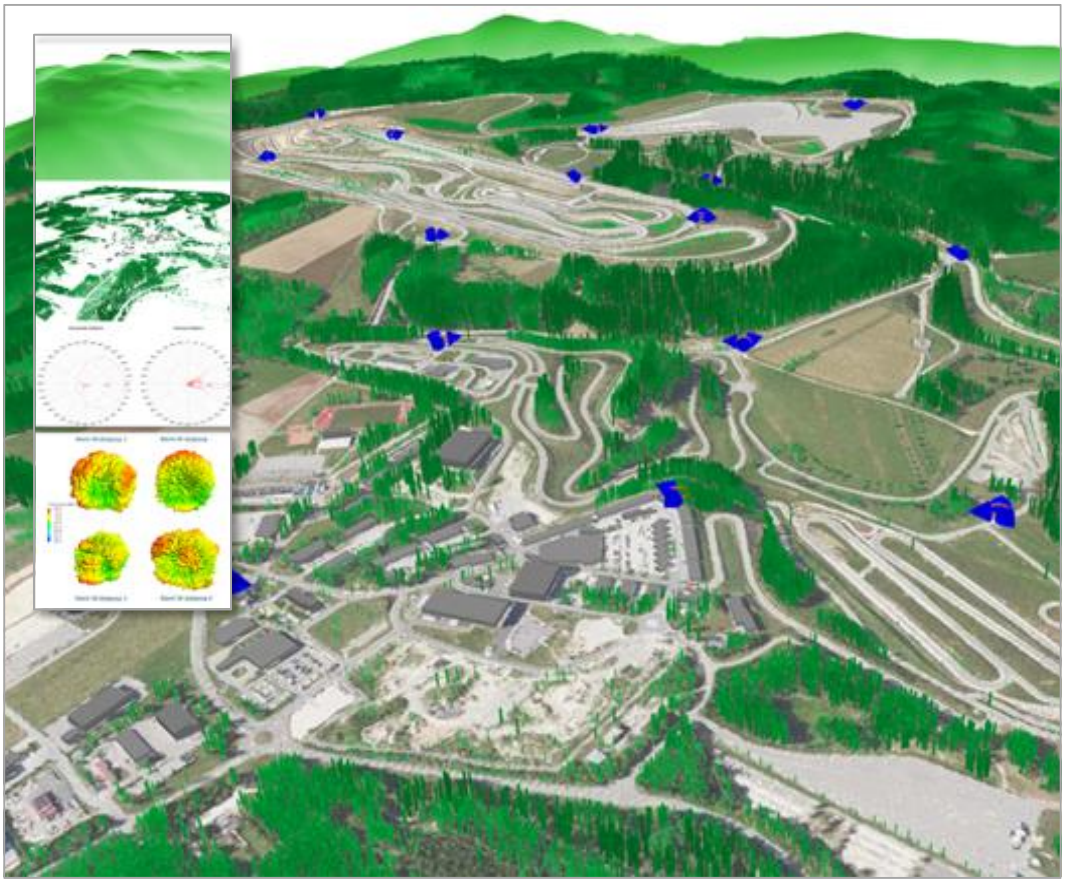

Abbildung 5: Virtuelle Welt in WinProp.

Die Güte der Simulationsergebnisse ist abhängig von einer Vielzahl von Parametern, welche sowohl die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen beschreiben als auch deren Interaktion mit der Umgebung (Mehrwegeausbreitung durch Reflektionen, Beugungen und Streuung). Durch die Verwendung elaborierter Optimierungsalgorithmen war es Altair möglich diese Parameter anhand der durchgeführten Messfahrten anzupassen, um realistische Simulationsergebnisse zu erzielen.

Die Simulationsergebnisse für einen Sektor in Rosenheim sind dargestellt in Abbildung 6. Dies ließ sich durch Validierung gegenüber anderen Messungen bestätigen, wie in Abbildung 7 zu sehen ist.

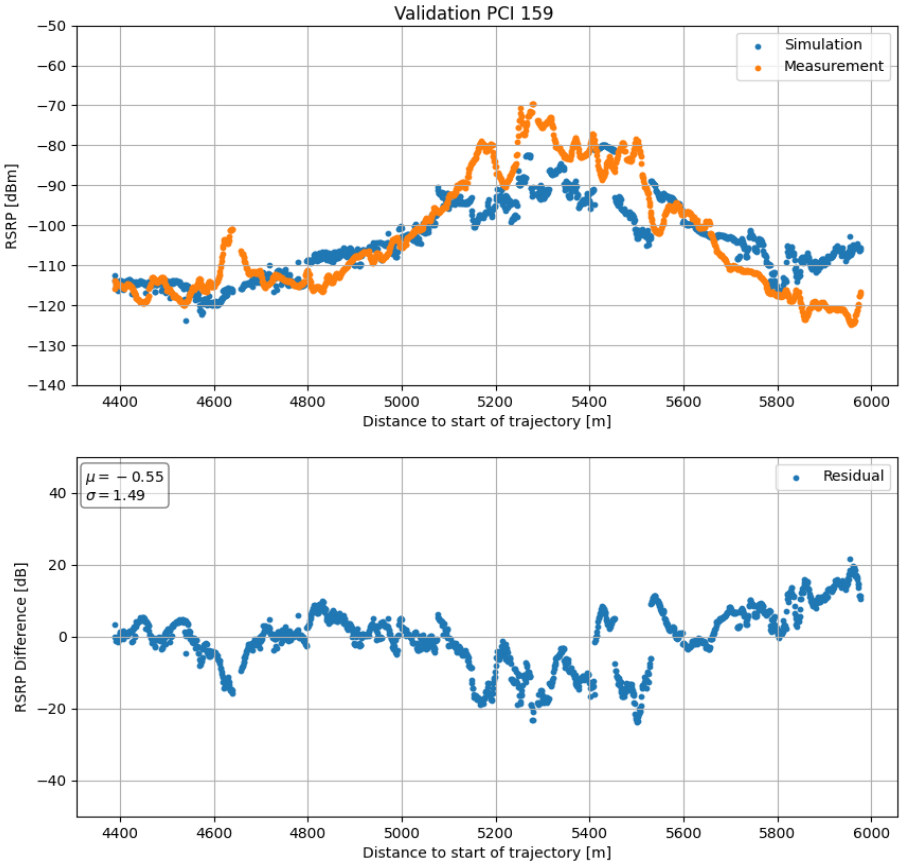

Abbildung 6: Validierung der Simulationsergebnisse anhand der PCI 159 in Rosenheim.

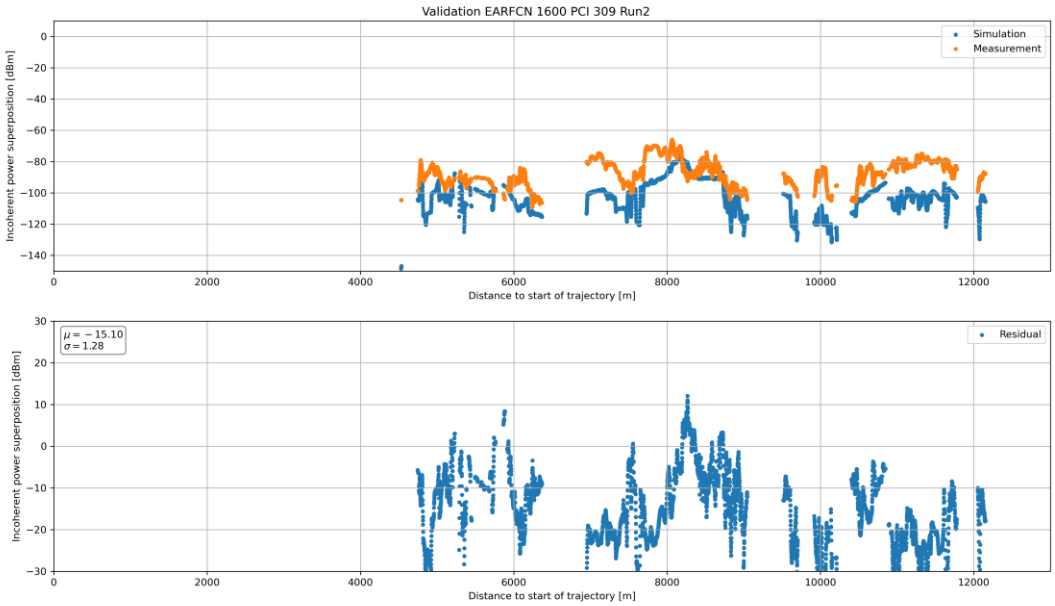

Abbildung 7: Validierung der Simulationsergebnisse anhand der PCI 309 in Immendingen.

Des Weiteren führten wir Vergleiche mit den Channel Sounding Messungen von Ilmenau durch, da die Messdaten Informationen über die Mehrwegeausbreitung enthalten, erlaubten uns diese eine genauere Betrachtung der Kanalmodelle. In Abbildung 8 ist das Leistungsverzögerungsprofil (Power-Delay-Profile) und in Abbildung 9 der Empfangswinkel sowohl der Mess- (blau) als auch der Simulationsergebnisse (orange) für eine Position dargestellt. Die grünen Darstellungen markieren die theoretischen Werte für eine direkte Sichtverbindung bzw. Line-of-Sight (LOS), welche sowohl für Mess- als auch Simulationsdaten korrekt ist.

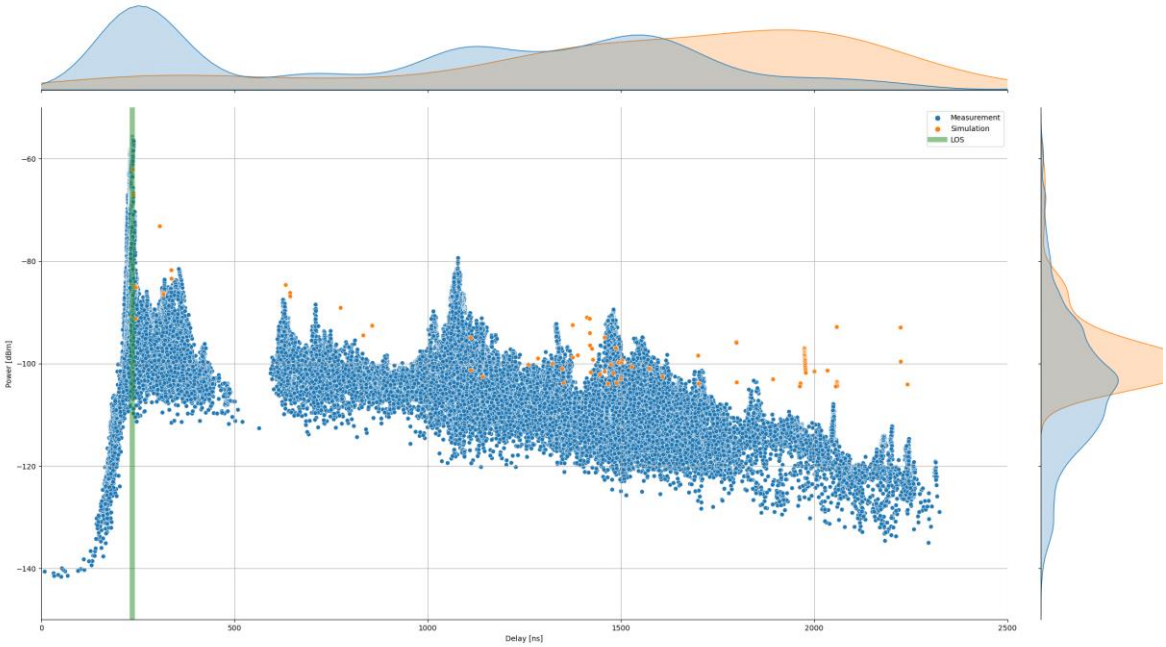

Abbildung 8: Validierung der Simulationsergebnisse anhand der Channel Sounding Messungen in Ilmenau. Vergleiche zwischen Messung und Simulation basierend auf dem Power-Delay-Profil.

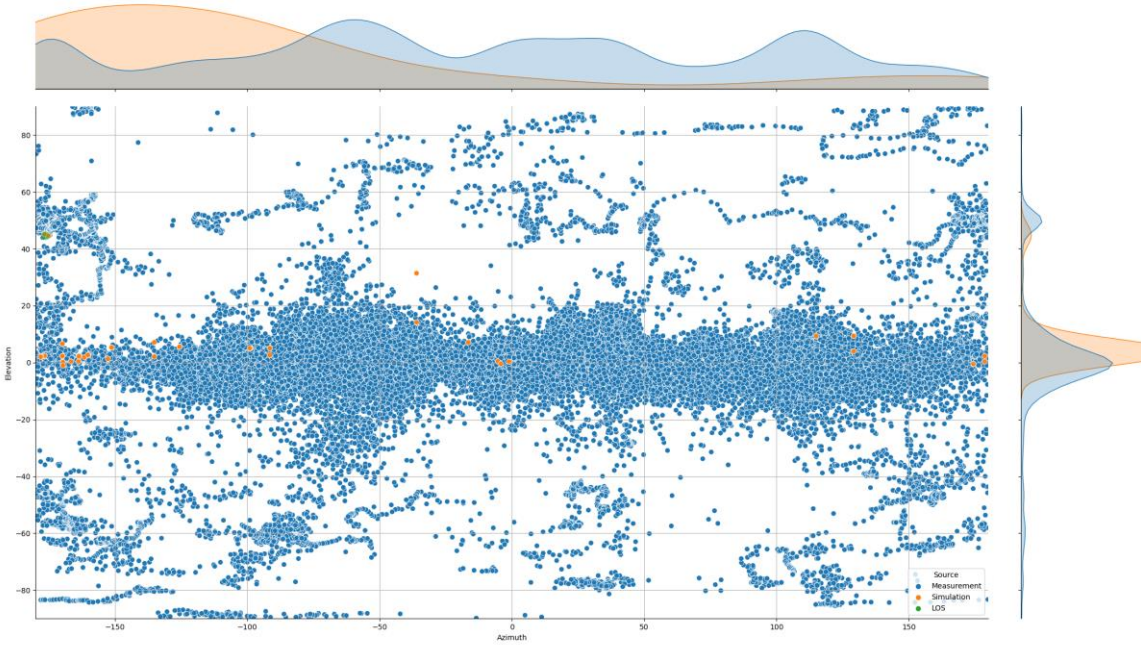

Abbildung 9: Validierung der Simulationsergebnisse anhand der Channel Sounding Messungen in Ilmenau. Vergleiche zwischen Messung und Simulation basierend auf dem Empfangswinkel.

Abbildung 10 zeigt die Visualisierung der einzelnen Ausbreitungspfade in Altair ProMan. Im Allgemeinen erkannte man eine gute Übereinstimmung zwischen Simulations- und Messergebnissen, besonders hinsichtlich des Azimuth-Winkels. Unterschiede zeigten sich jedoch bezüglich den Leistungswerten für hohe Verzögerungswerte, die Ursache hierfür sind Interaktionen mit weit entfernten Gebäuden, welche in der Messung weniger stark zutage treten. Eine weitere Auffälligkeit zeigte sich in den Messdaten in Form von Verzögerungswerten (Delay) geringer als die minimale Verzögerung der LOS. Dies wurde durch die Transformationen während der Nachbearbeitung der Messdaten verursacht.

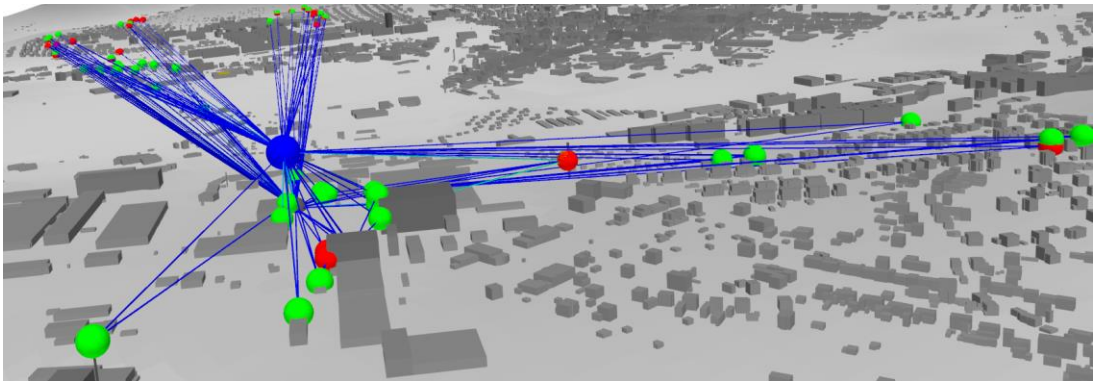

Abbildung 10: Darstellung der verglichenen Strahlwege in ProMan für eine Position in Ilmenau.

Diese Simulationsszenarien bilden den Grundstein des Digital Twins, da sie die virtuelle Welt darstellen, welche verschiedenste Vorteile gegenüber klassischen Messfahrten vorweisen. Simulationen stellen eine reproduzierbare und flexible Datenquelle dar. Hierdurch ist es möglich die Auswirkungen von Variationen an den Ausgangsparametern in einem gleichbleibenden Szenario zu untersuchen. Beispielsweise ist es möglich verschiedene Antennenkonfigurationen miteinander zu vergleichen, ohne unerwünschte Einflüsse der Umgebung.

Indem wir es ermöglichten die Ergebnisse der virtuellen Welt in der Emulation wiederzugeben, entwickelten wir ein Verfahren, um bestehende Hardware unter gleichbleibenden Bedingungen evaluieren zu können. Zudem liefern Simulationen weitere Parameter, welche in Messfahrten schwer zu erfassen sind, wie Informationen über den Angular- als auch den Verzögerungsspreizung (Delayspread). Deshalb bietet die virtuelle Welt die Möglichkeit Messfahrten zu komplementieren, sodass auch diese für die Emulation verwendet werden können.

Damit ein guter Ausgangspunkt für die Umsetzung der KI-Verfahren gegeben ist, führten wir statistische Analysen der zuvor definierten KPIs durch. Ein Beispiel ist in Abbildung 11 dargestellt, man sieht starke Korrelationen zwischen den Leistungspegelparametern, der Rang zeigt sich jedoch als nahezu unabhängig von den anderen betrachteten Werten. Daraus schlossen wir zum einen, dass sich die Komplexität reduzieren lässt, indem man die korrelierten Variablen zuerst in unkorrelierte transformiert. Zum anderen zeigten die Analysen, dass der MIMO-Rang einen essenziellen Parameter darstellt.

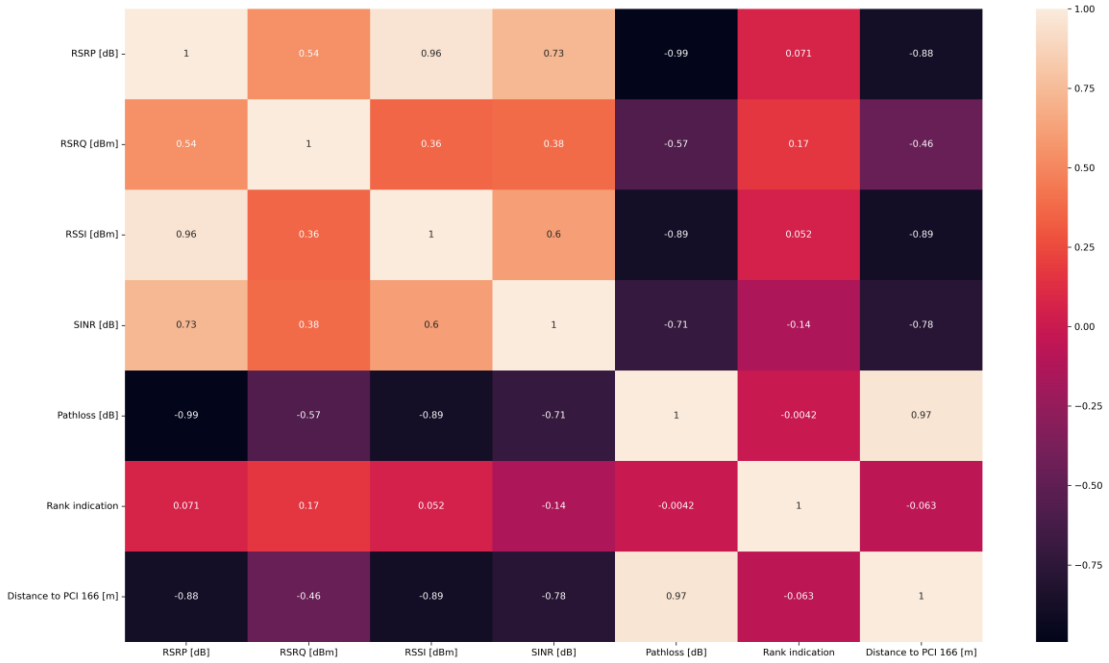

Abbildung 11: Korrelationsmatrix der gemessenen Daten einer Rosenheim Messfahrt.

Ein weiteres Ziel war eine realistische Abbildung von Zellwechsel bzw. Handovern zwischen Basisstationen sowohl in der Simulation als auch in der Emulation. Bisher wurde ein Wechsel zwischen Basisstationen ausschließlich aufgrund momentan berechneter Leistungswerte ausgelöst. Dieses Vorgehen führt zu Ping-Pong-Effekten, da keine zeitliche Komponente als Puffer in die Methode einfließt. Damit dieses Ziel erfolgreich umgesetzt werden konnte, führten wir zuerst Analysen des Handoververhaltens der Messfahrten in Rosenheim durch. Abbildung 12 zeigt den Verlauf der Physical Cell Identity (PCI) über den Verlauf der Strecke für die Messfahrten der beiden Messkampagnen. Obwohl stets die gleiche Strecke gefahren wurde, kann man in einigen Bereichen starke Abweichungen im Handoververhalten erkennen. Da es sich beim getesteten Netz um ein privates Netzwerk handelt, können diese Unterschiede nicht durch unterschiedliche Auslastungen zustande kommen, sondern werden durch Dynamiken im Netzwerk und der Umgebung verursacht.

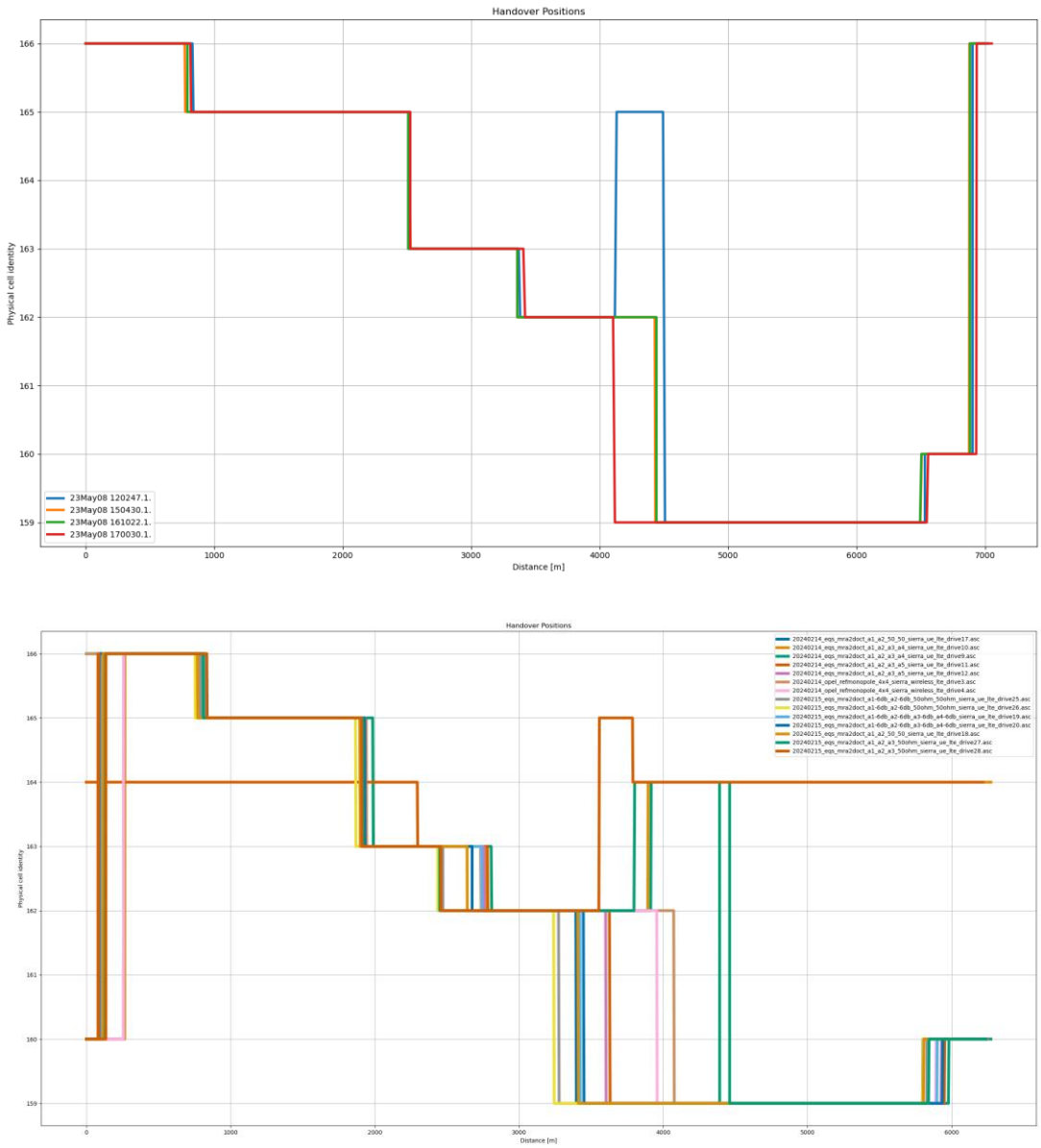

Abbildung 12: Vergleich des Handoververhaltens zwischen den Messkampagnen in Rosenheim durchgeführt im Juli 2023 (oben) und Februar 2024 (unten).

Um realistische Handover nachstellen zu können, implementierten wir ein LSTM NN zur Analyse der charakteristischen Parameter, welche das Handoververhalten definieren. Diese lassen sich durch die Ungleichung

$$Meas_Neigh + Offset - Hys > Meas_Serv$$

beschreiben, deren Erfüllung nach dem Time to Trigger (TTT) einen Handover auslöst. $Meas_Neigh$ und $Meas_Serv$ stellen RSRP oder RSRQ-Messung der eingebuchten, beziehungsweise der Nachbarzelle dar. $Offset$ und Hys sind zellspezifische Parameter, welche konfiguriert werden können. Nachdem die entsprechende Ungleichung ebenfalls in Altair ProMan umgesetzt wurde, konnten die gewonnenen Parameter direkt in der Simulationsumgebung verwendet und

getestet werden. Es gelang uns Ping-Pong-Effekte zu vermeiden, wie in Abbildung 13 und Abbildung 14 zu sehen ist.

Abbildung 13: Draufsicht der Zellzuweisung ohne (link) und mit (rechts) Handoverparameter.

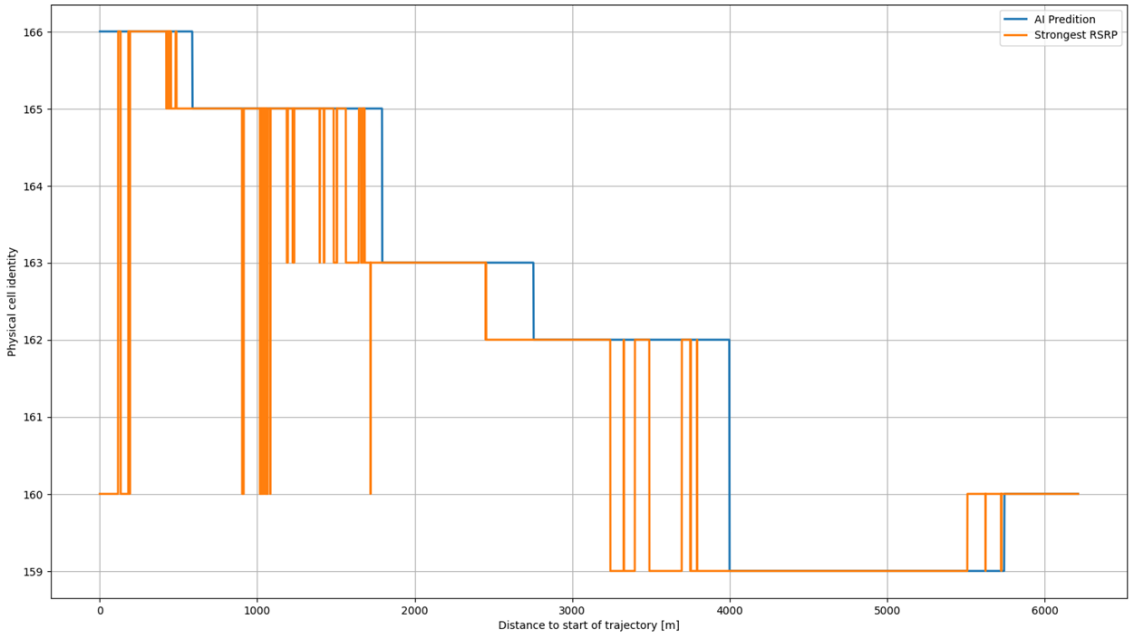

Abbildung 14: Verlauf der Zellzuweisung ohne (orange) und mit (blau) Handoverparameter.

Um die Emulationszeit effizient zu nutzen, ist es wichtig aus einer Messung ein Maximum an Erkenntnissen ziehen zu können. Jedoch sind Daten aus Messfahrten und Simulationen redundant hinsichtlich der getesteten Szenarien und Charakteristika. Es ist daher sinnvoll die Daten entsprechend ihrer Charakteristik aufzuteilen und Redundanzen zu minimieren. Ein Weg dies zu erreichen ist die Nutzung von Cluster-Algorithmen, daher haben wir innerhalb des Projekts verschiedene Verfahren getestet und miteinander verglichen. Die betrachteten Algorithmen sind *k*-Means, Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) und Gaussian Mixture Models (GMM).

k-Means teilt einen Datensatz in *k* separate Gruppen (Cluster) basierend auf der Ähnlichkeit der verwendeten Parameter. Hierbei wird jedes Cluster vom Mittelwert der enthaltenen Punkte repräsentiert, wodurch eine Minimierung der Punktabstände innerhalb eines ermöglicht wird. *k*-Means ist ein einfacher, schneller Algorithmus, der gut für kugelförmige Cluster funktioniert, jedoch zu unvorteilhaften Ergebnissen führen kann, wenn die Clusterdichten variieren und nicht kugelförmig sind. Dieses Verhalten ist links in Abbildung 15 dargestellt.

DBSCAN hingegen ist in der Lage Cluster von beliebiger Form und Größe zu erkennen, selbst wenn der Datensatz Rauschen und Ausreißer enthält. Dies wird erreicht, indem Cluster in Bereichen mit hoher Punktdichte gebildet werden. Punkte werden basierend auf einem festgelegten Radius zu benachbarten Punkten Clustern zugeordnet. Ein Beispiel ist rechts in Abbildung 15 zu sehen. Allerdings variieren die optimalen Einstellungsparameter für DBSCAN stark abhängig vom zu gruppierenden Datensatz, weshalb wir uns gegen DBSCAN entschieden haben.

Abbildung 15: Vergleich der Cluster Algorithmen k*-Means und DBSCAN.*

GMM modelliert Daten als Mischung von Gauß Verteilungen und teilt jedem Datenpunkt Wahrscheinlichkeiten zu, welche die Zugehörigkeit zu den Gruppen beschreibt. Mithilfe eines Maximum-Likelihood-Verfahren werden diese Wahrscheinlichkeiten schrittweise optimiert. Obwohl GMM rechenintensiv ist, entschieden wir uns in weiteren Schritten GMM zu verwenden, da es der flexibelste Algorithmus ist.

Damit die Cluster leichter zu visualisieren und zu bewerten sind, benutzten wir die Hauptkomponentenanalyse (PCA) um eine Reduktion der Dimensionen zu erreichen. Um trotzdem ein Maximum an Informationen zu erhalten, wird hierfür eine Singulärwertzerlegung der Kovarianzmatrix durchgeführt. Dadurch werden Hauptkomponenten bestimmt, mit deren Hilfe die ursprünglichen Parameter als Linearkombination dargestellt werden können und unabhängig voneinander sind. In Abbildung 16 ist ein Beispiel der Hauptkomponenten eines Messdatensatzes von Rosenheim der PCI 166 dargestellt, sowie der Anteil jedes Parameters an den Hauptkomponenten.

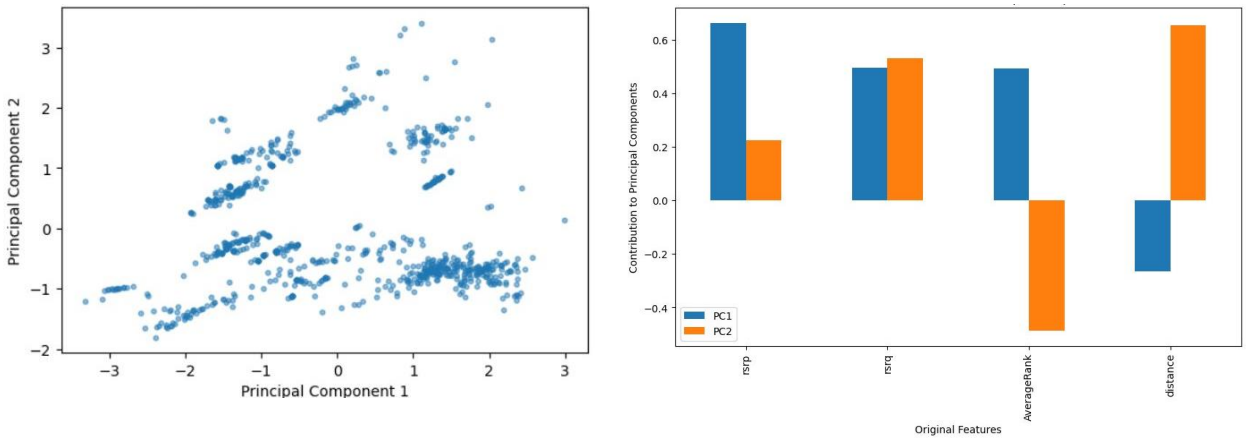

Abbildung 16: Beispiel der Hauptkomponenten eines Messdatensatzes von Rosenheim der PCI 166, die verwendeten Parameter sind RSRP, RSRQ, Rang und die gefahrene Distanz.

Anschließend testeten wir unterschiedliche Vorgehensweisen zur Reduktion der Daten innerhalb der Cluster, mit dem Ziel einer geringeren Emulationszeit. Zwei der Methoden basierten auf dem iterativen Entfernen von Punkten solange sich der Mittelwert und die Varianz innerhalb des Clusters in einem vorgegebenen Rahmen bewegt. Erstere reduzierte Punkte, welche am weitesten vom Cluster Zentrum entfernt sind mit dem Ziel die Hauptmerkmale des Clusters beizubehalten. In Abbildung 17 sind die Ergebnisse des Clustering dargestellt, sowie die anschließende Reduktion innerhalb der Cluster mithilfe des genannten Verfahrens. Man sieht, dass das Verfahren an einigen Stellen stärker vom ursprünglichen Datensatz abweicht, da hier die Entfernung zum Clustermittelpunkt am größten war. Dies ist auch in Abbildung 18 zu sehen, welche die PCA-Projektion des originalen (links) und reduzierten (rechts) Datensatzes darstellt.

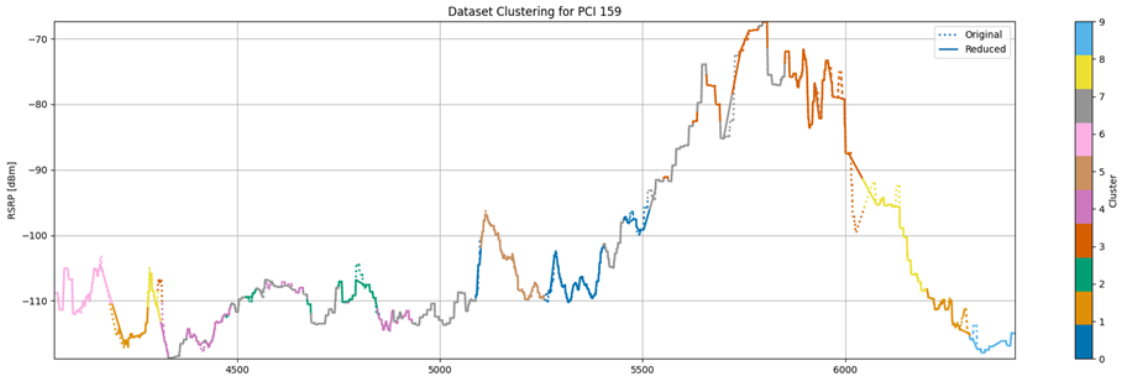

Abbildung 17: Clustering Ergebnisse und Reduzierung des Datensatzes basierend auf den Cluster Zentren, dargestellt anhand des gemessenen RSRP gegenüber der gefahrenen Strecke.

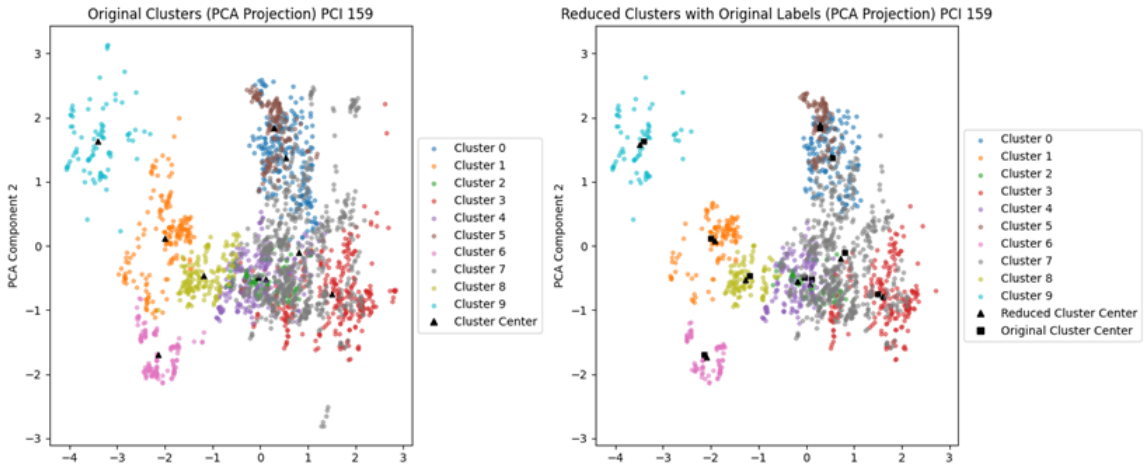

Abbildung 18: Clustering Ergebnisse und Reduzierung des Datensatzes basierend auf den Cluster Zentren, dargestellt anhand der PCA des Datensatzes.

Um eine gleichmäßigere Reduktion zu erreichen, wählte die zweite Methode Punkte, welche die geringste Distanz zu den nächsten Punkten aufwiesen. Der Zweck dieses Vorgehens ist eine Erhaltung der Struktur des Clusters bei gleichzeitiger Reduktion der Redundanzen. Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen wieder die Ergebnisse im RSRP-Verlauf und in der PCA-Darstellung. Es ist deutlich zu sehen, dass bei einer gleichbleibenden Beschränkung der Bewegung des Mittelwerts und der Varianz eine höhere Reduktion erreicht wird.

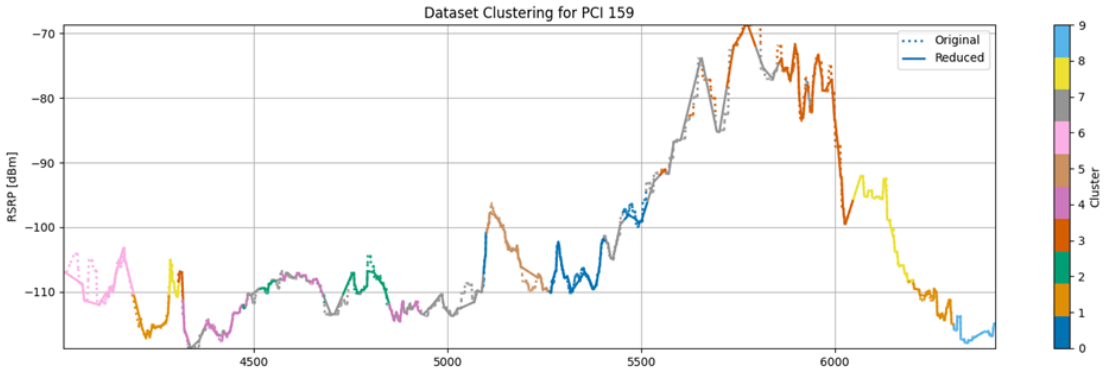

Abbildung 19: Clustering Ergebnisse und Reduzierung des Datensatzes basierend auf dem nächstgelegenen Punkt, dargestellt anhand des gemessenen RSRP gegenüber der gefahrenen Strecke.

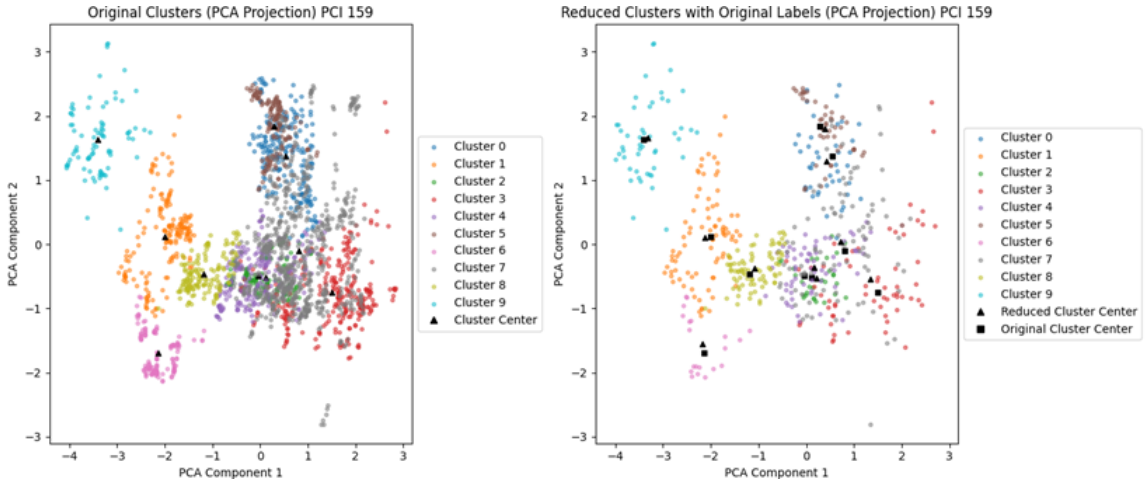

Abbildung 20: Clustering Ergebnisse und Reduzierung des Datensatzes basierend auf dem nächstgelegenen Punkt, dargestellt anhand der PCA des Datensatzes.

Das dritte Verfahren entfernte jeden n-ten Punkt des geclusterten Datensatzes. Die Ergebnisse sind in Abbildung 21 und Abbildung 22 zu sehen.

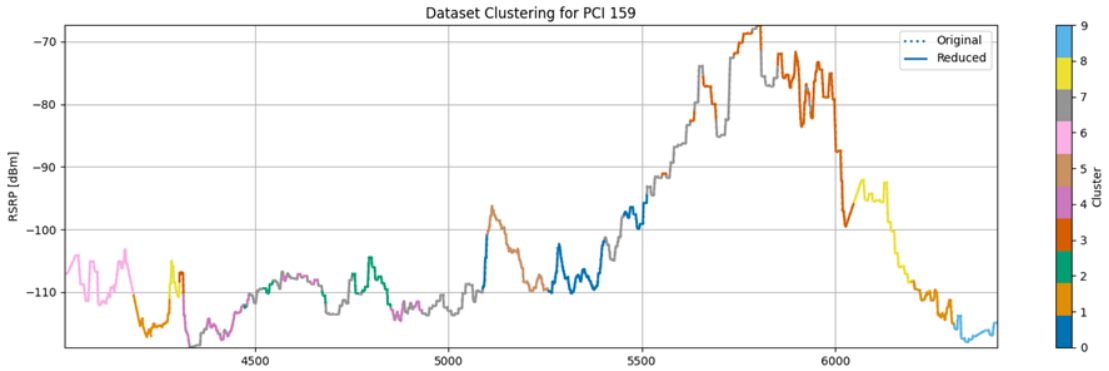

Abbildung 21: Clustering Ergebnisse und Reduzierung jeden zweiten Punktes des Datensatzes, dargestellt anhand des gemessenen RSRP gegenüber der gefahrenen Strecke.

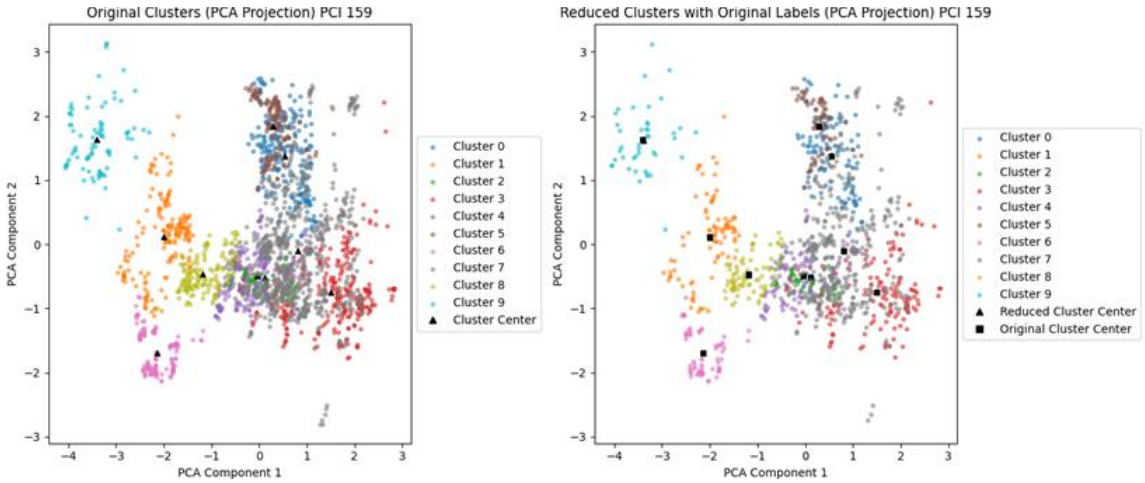

Abbildung 22: Clustering Ergebnisse und Reduzierung jeden zweiten Punktes des Datensatzes, dargestellt anhand der PCA des Datensatzes.

Ein Vergleich der Vorgehensweisen ist in Abbildung 23 sowie Tabelle 1 zu sehen. Es zeigte sich, dass eine Eliminierung jedes zweiten Punktes die geringsten Abweichungen zum originalen Datensatz sowie auch besten Ergebnisse in der Emulation liefert.

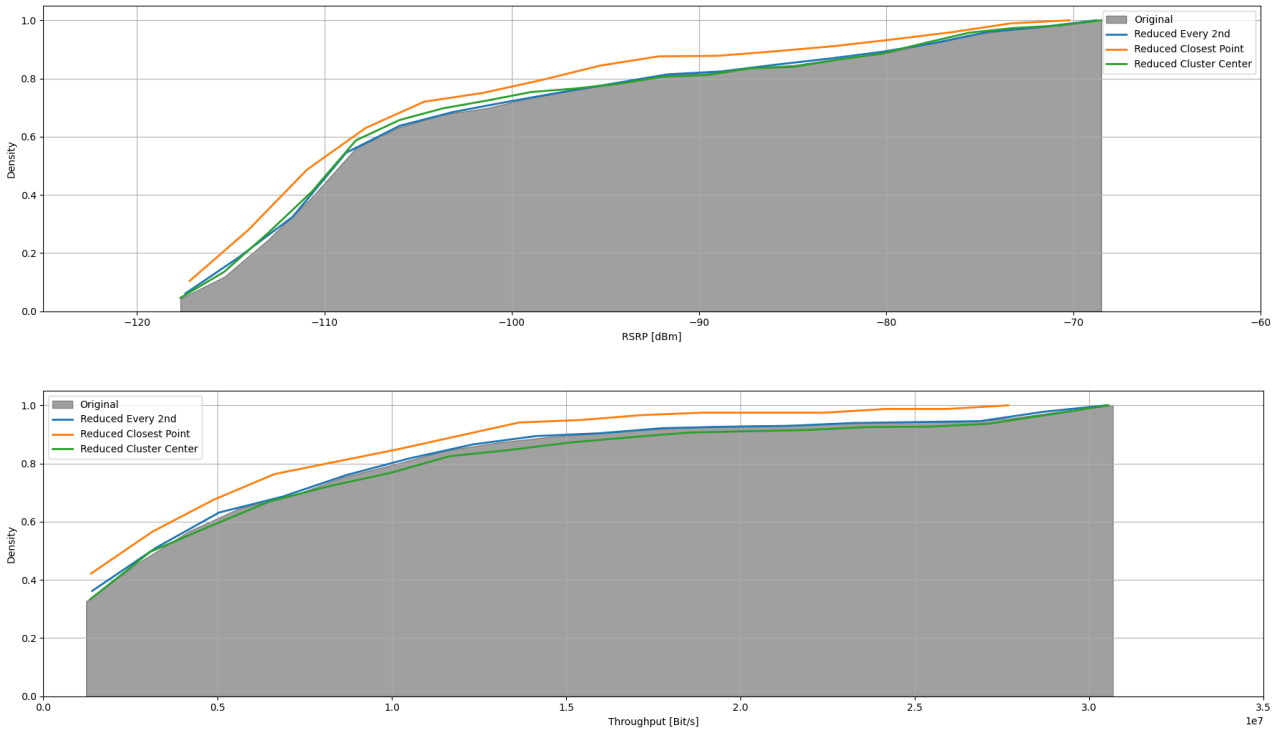

Abbildung 23: Vergleich der Reduzierungsalgorithmen, basierend auf der cumulative density function (CDF) von RSRP und Throughput.

Tabelle 1: Vergleich der Reduktionsmethoden hinsichtlich der reduzierten Datenpunkte. (a) steht für die Methode basierend auf dem Cluster Zentrum, (b) für das Verfahren beruhend auf der geringsten Distanz und (c) die Reduzierung jedes zweiten Punktes.

PCI	Original Dataset	Reduced Dataset (a)	Ratio (a)	Reduced Dataset (b)	Ratio (b)	Reduced Dataset (c)	Ratio (c)
160	319	233	0.73	161	0.5	161	0.5
166	738	550	0.75	327	0.44	372	0.5
163	643	440	0.68	240	0.37	326	0.5
165	1394	933	0.67	368	0.26	700	0.5
159	2190	1582	0.72	565	0.26	1098	0.5
162	447	331	0.74	184	0.41	224	0.5
Overall	5731	4069	0.71	1845	0.32	2881	0.5

2.1.4 UAP6.3 Implementation KI-Modelle im Digital Twin

Um sowohl Mess-, Simulations- und auch Emulationsdaten im Rahmen des Digital Twins nutzbar zu machen, war es zuerst notwendig, die verschiedenen Datenformate einlesen zu können. Zu diesem Zweck haben wir Python Skripte implementiert, mit deren Hilfe Datensätze aus den Datenquellen ROMES, NEMO, Channel Sounding und WinProp einheitlich verarbeitet werden können. Hierfür bezogen wir uns auf die KPI-Liste, welche innerhalb des AP2 definiert wurde. Außerdem werden GPS-Koordinaten potenziell korrigiert und an das Simulationsraster angepasst. Die Struktur der Implementierung ist in Abbildung 24 dargestellt.

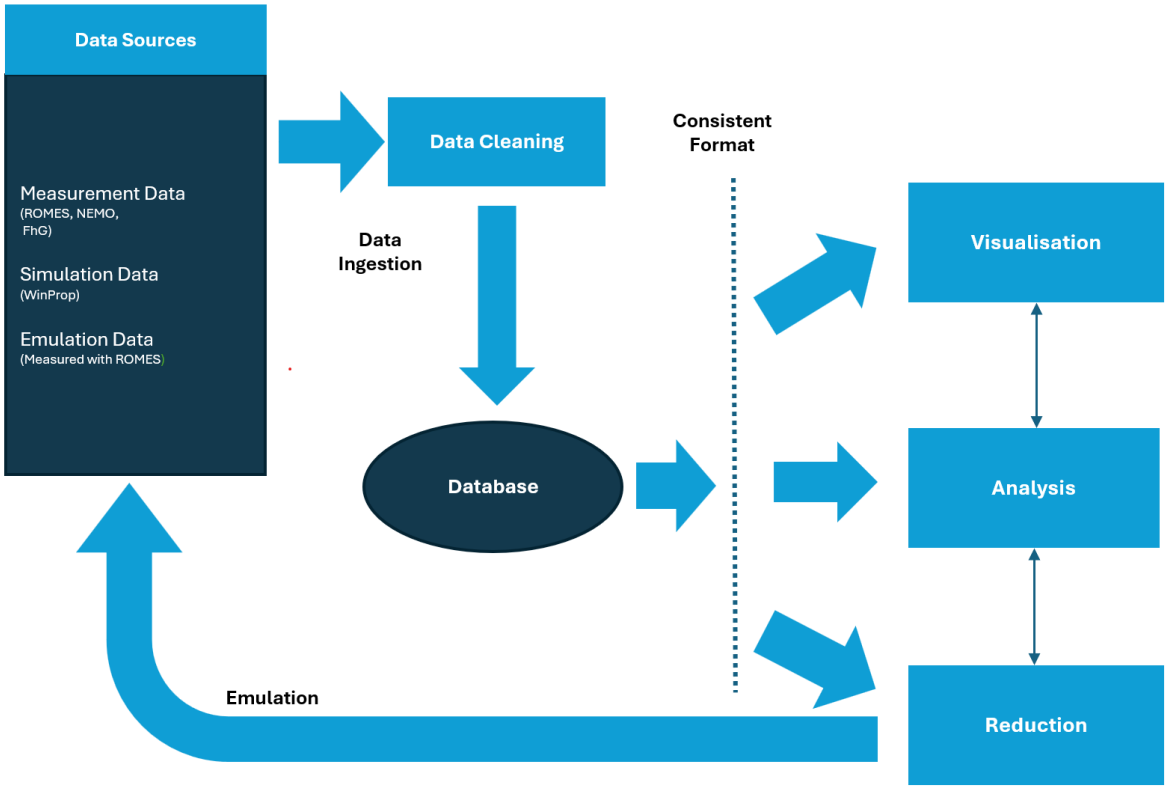

Abbildung 24: Implementierungsstruktur des Digital Twin.

Die Installation von RapidMiner in der Mercedes Umgebung stellte uns vor die Herausforderung eines spezifischen Proxys, welcher die Verbindung zum AltairOne Server blockierte. Eine Lösung fand sich im Aufsetzen eines lokalen Lizenz Managers anstatt der Handhabung über AltairOne.

Zu Beginn der Installation und Implementierungen war nicht endgültig klar, welche Struktur der Datenbank zukünftig benötigt wird. Da NoSQL Datenbanken eine größere Flexibilität hinsichtlich der Datenstrukturen bieten, hatten wir uns daher initial für das Aufsetzen einer Cassandra Datenbank entschieden. Nachdem die Entscheidungen hinsichtlich der Architektur der Datenbank fortgeschritten waren, beschlossen wir einen Wechsel zu PostgreSQL wegen der besseren Unterstützung seitens Altair RapidMiner und der Mercedes Umgebung.

Dies ermöglichte es sowohl das Ein- sowie auch das Auslesen von Daten mithilfe der WebAPI von RapidMiner umzusetzen. Hierfür wurden eingehend erwähnte Skripte zum Ein- und Auslesen, sowie zum Verarbeiten als Prozesse in RapidMiner implementiert, welche eine dynamische

Auswahl des Users erlauben. Diese Prozesse werden in Altair AI Hub dokumentiert, verwaltet und als Endpoint aufgesetzt. Diese Endpoints können mithilfe der REST API innerhalb des Mercedes Netzwerks angesprochen und verwendet werden. Hierdurch konnte sowohl eine hohe Flexibilität für die Zukunft gewährleistet werden und auch Sicherheitsaspekte wie eine Zwei-Faktor-Authentifizierung (2FA) übertragen werden.

Die Umsetzung der graphischen Benutzeroberfläche (GUI) nutzt die aufgesetzten AI Hub Endpoints, wodurch sämtliche Berechnungen auf dem leistungsstarken Server durchgeführt werden und ausschließlich die Ergebnisse kommuniziert und dargestellt werden müssen. Deshalb gestalteten wir die GUI zweigeteilt, Funktionalitäten verbunden mit der Visualisierung, Analyse und Prozessierung getrennt vom Datenimport. Ersteres haben wir in Panopticon, einem Teil von RapidMiner, durchgeführt. Es erlaubt eine nahtlose Anbindung an die aufgesetzte WebAPI und damit eine dynamische Visualisierung und Prozessierung der gewählten Datensätze. Hiermit können Datensätze unabhängig der Datenquelle miteinander analysiert, prozessiert und verglichen werden, eine Darstellung findet sich in Abbildung 25. Die Trennung zwischen Panopticon und dem Datenimport erlaubte es uns, die Kommunikation großer Datenmengen zwischen Panopticon und AI Hub auf eine Richtung zu beschränken und nur vom Benutzer gewählte Parameter werden von Panopticon übergeben.

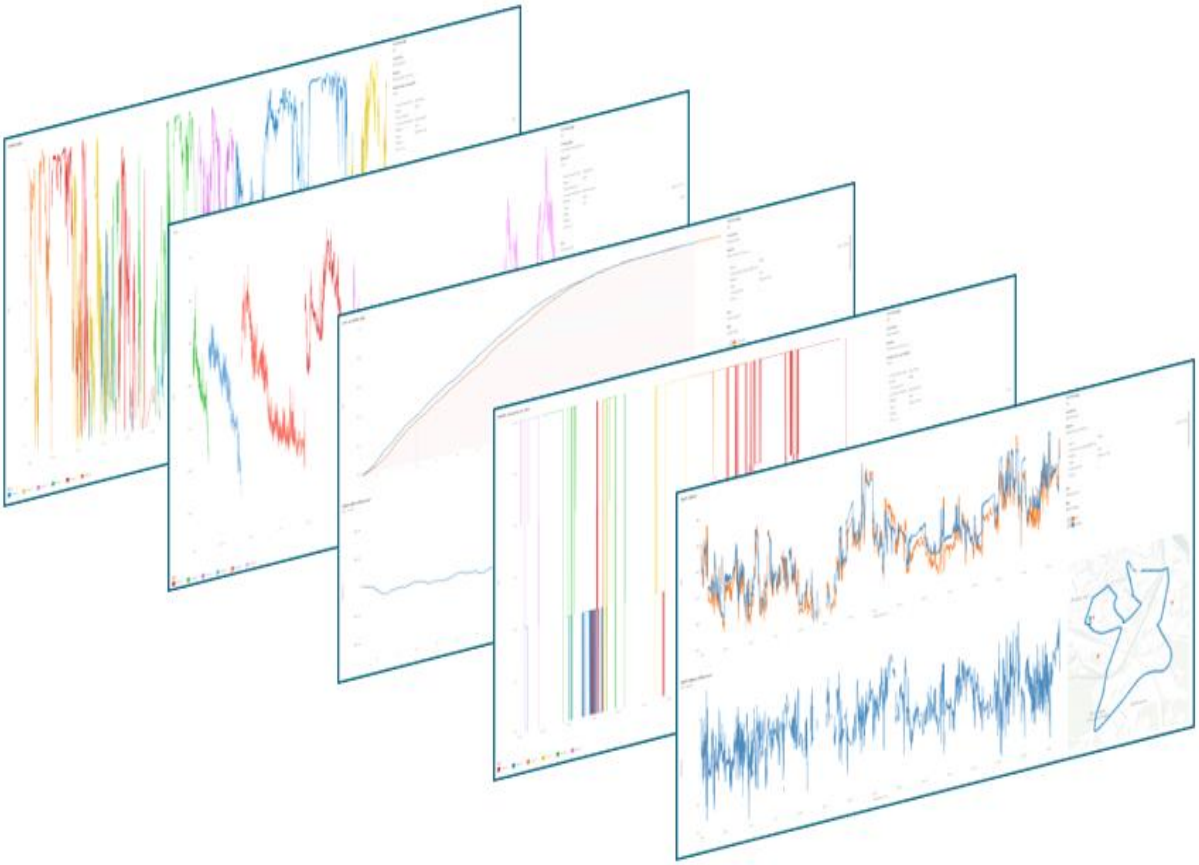

Abbildung 25: Darstellung der Vielfalt an Analysemöglichkeiten mithilfe der Panopticon Implementierung.

Ebenso können sie auf statistische Weise untersucht werden, dargestellt in Abbildung 26, und dadurch eine Bewertung der Antennenkonfiguration unternommen werden. In Abbildung 27 ist ein Beispiel zu sehen.

Die obengenannten Importfunktionalität wurden innerhalb einer Python Benutzeroberfläche zusammengeführt und mit der RapidMiner API verbunden. Dieses Vorgehen erlaubte auch hier die Nutzungen der RapidMiner Authentifizierung und eine flexible Gestaltung der Datenbank.

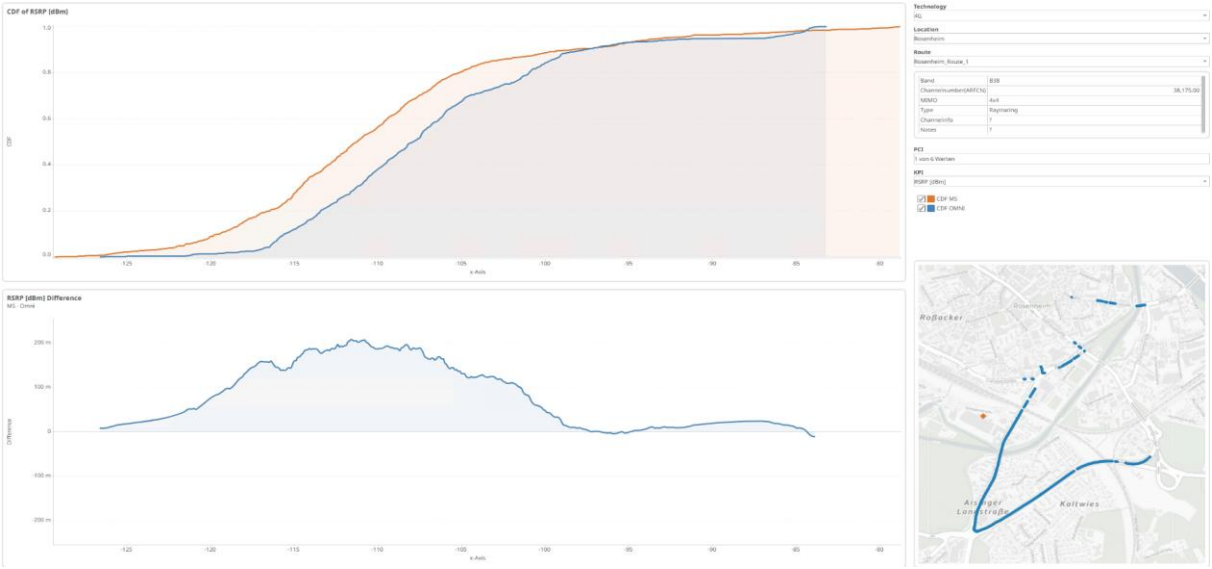

Abbildung 26: Statistischer Vergleich zweier Antennenkonfigurationen in Altair Panopticon.

Abbildung 27: Vergleich zweier Antennenkonfigurationen in Altair Panopticon.

2.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Der zahlenmäßige Nachweis liegt dem Fördergeber vor. Den größten Umfang haben die Personalkosten eingenommen. Reisekosten und Fremdleistungen haben in diesem Vorhaben einen sehr geringen Anteil ausgemacht.

2.3 Notwendigkeit der Förderung

Ohne die durchgeführten Arbeiten, die einen hohen Entwicklungs- und Forschungsaufwand erforderten, wäre eine Weiterentwicklung in diesem Bereich nicht möglich gewesen. Die unterstützenden Fördermaßnahmen waren daher unerlässlich. Die Beteiligung an einem Konsortium und der damit verbundene Know-how-Austausch waren für die erfolgreiche Durchführung von zentraler Bedeutung, da eine Zusammenarbeit in dieser Form anders nicht möglich gewesen wäre. Trotz der bestehenden Risiken waren die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten entscheidend, um das Fachwissen von Altair zu erweitern und Know-how aufzubauen.

Aufgrund des neuartigen Ansatzes, Entwicklung und praktische Untersuchung eines hybriden, intelligenten digitalen Zwillings für die Untersuchung und Bewertung der integrierten Kommunikationssysteme in Fahrzeugen, bedurfte es eines erheblichen finanziellen Aufwandes für die vorwettbewerbliche Entwicklung. Die allein auf Eigenmittel gestützte Entwicklung war dadurch für ein Unternehmen mit der Größe der Altair Engineering GmbH nicht möglich, so dass das Entwicklungsvorhaben einer zusätzlichen Förderung bedurfte.

Durch das Projekt wurde ein Technologievorsprung erarbeitet. Zusätzlich wurde damit eine anwendungsbezogene, industrielle Grundlage geschaffen. Die erreichten Projektergebnisse leisten aufgrund ihres innovativen Charakters einen Beitrag zum technisch-wissenschaftlichen Fortschritt im Bereich der Untersuchung von Fahrzeugkommunikationssystemen. Zu deren Erreichung wurde das veranschlagte Kostenbudget fast vollständig ausgeschöpft

2.4 Nutzen und Verwertbarkeit

Das im Projekt aufgebaute Wissen wird aktiv bei Altair in der Entwicklung von der Software Feko für die Simulation von Kommunikationssystemen genutzt. Darüber hinaus wird der im Projekt umgesetzte Datenschnittstelle für Kanalemulatoren implementiert und für alle Nutzer der Alatri Software Feko zur Verfügung gestellt. Ein zentrales Ergebnis ist die nachhaltige Vernetzung der Projektpartner. Neue Kooperationen wurden initiiert, Schnittstellen geschaffen und die Grundlage für eine fortgesetzte Zusammenarbeit über das Projektende hinaus gelegt. Damit wird nicht nur die Weiterentwicklung der im Projekt erarbeiteten Ansätze gesichert, sondern auch die Bearbeitung zukünftiger Themenfelder ermöglicht. Nicht zuletzt hat DOCT erste Impulse für die Entwicklung neuer Standards im Bereich der Fahrzeug-Connectivity-Systemtests gesetzt.

2.5 Fortschritte Dritter im Forschungsgebiet

Während der Durchführung des Vorhabens sind keine direkten Fortschritte Dritter im relevanten Forschungsgebiet bekannt geworden, die einen unmittelbaren Einfluss auf die Projektziele oder

den Projektverlauf gehabt hätten. Es wurden regelmäßige Recherchen in Fachpublikationen und Datenbanken durchgeführt, um den aktuellen Stand der Forschung zu verfolgen und sicherzustellen, dass das Projekt auf dem neuesten Stand der Technik basiert. Die Ergebnisse des Projekts tragen dazu bei, den Wissensstand in diesem Bereich zu erweitern.

2.6 Veröffentlichungen

Das Projekt DOCT wurde seitens Altairs bisher auf keiner Veranstaltung präsentiert oder Ergebnisse auf andere Weise veröffentlicht außer im Rahmen des Konsortiums und der Projektwebseite (www.doct-projekt.de).

3 Literaturverzeichnis

Schirmer, C. (2018). Over-The-Air Testing using Wave-Field Synthesis. *Universitätsverlag Ilmenau*.

T. Rautiainen, G. W. (2002). Verifying Path Loss and Delay Spread Predictions of a 3D Ray Tracing Propagation Model in Urban Environments. *56th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*.

WINNER II interim channel models. (30. 11 2006). Von https://www.tu-ilmenau.de/fileadmin/Bereiche/EI/nt/pdfs/D1.1.1.pdf abgerufen