



netidee

PROJEKTE

RoboSim5G

Endbericht | Call 19 | Projekt ID 7394

Lizenz CC BY

Inhalt

1 Einleitung	3
2 Projektbeschreibung	3
3 Verlauf der Arbeitspakete	6
3.1 Arbeitspaket 1 - Detailplanung und Formales am Projektstart	6
3.2 Arbeitspaket 2 - Projektmanagement & Kommunikation	7
3.3 Arbeitspaket 3 - Entwicklung des 5G-Plugins für Gazebo	8
3.4 Arbeitspaket 4 - Erweiterung der 5G-Funktionen	11
3.5 Arbeitspaket 5 - Erstellung und Veröffentlichung der Dokumentation	13
3.6 Arbeitspaket 6 - Community-Integration und Open-Source-Arbeit	14
4 Liste Projektendergebnisse	15
5 Verwertung der Projektergebnisse in der Praxis	18
6 Öffentlichkeitsarbeit/ Vernetzung	19
7 Eigene Projektwebsite	22
8 Geplante Aktivitäten nach netidee-Projektende	22
9 Anregungen für Weiterentwicklungen durch Dritte	25

1 Einleitung

Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines 5G-Plugins für die Robotiksimulationssoftware Gazebo, um realitätsnahe 5G-Kommunikation in Robotiksimulationen zu ermöglichen. Damit können Roboter, die über 5G kommunizieren oder 5G Network APIs (z.B. CAMARA, Localization, Quality of Service) nutzen, in Gazebo entwickelt und Ende-zu-Ende getestet werden.

Dazu wurde ein simuliertes User Equipment (UE) und eine gNodeB (Basisstation) als Plugins umgesetzt und mit Open-Source-5G-Core-Netzen wie OpenAirInterface, Free5GC und Open5GS verbunden. Bestehende 5G Soft-UEs und Soft-gNBs von dem Open-Source-Projekt OpenAirInterface wurden dafür an Robotik-Use-Cases angepasst.

2 Projektbeschreibung

2.1 Projektziele und Motivation

Das primäre Ziel von RoboSim5G war die Auflösung der technologischen Barriere zwischen der Welt der Mobilfunktechnik und der Robotik-Entwicklung. In der modernen Industrie 4.0 ist die zuverlässige Vernetzung von autonomen Systemen über 5G-Campusnetze ein entscheidender Erfolgsfaktor. Dennoch standen Entwickler:innen bisher vor der Herausforderung, dass spezialisierte 5G-Funktionen wie Network-Slicing, Quality of Service oder präzise Lokalisierung erst sehr spät im Entwicklungszyklus – nämlich bei Verfügbarkeit physischer Hardware – getestet werden konnten.

RoboSim5G verfolgte daher das Ziel, einen „Digital Twin“ der Netzwerkkumgebung direkt in der Simulationsumgebung Gazebo zu schaffen. Ein wesentlicher Fokus lag dabei auf der Realitätsstreue: Die Simulation sollte nicht nur eine einfache Datenverbindung suggerieren, sondern das tatsächliche Verhalten eines 5G-Stacks abbilden. Dazu gehörte die Integration von Network-APIs (z. B. CAMARA), um Funktionen wie Standortabfragen oder Bandbreitenreservierungen programmatisch aus der Robotersteuerung heraus zu evaluieren. Ein weiteres Kernziel war die konsequente Ausrichtung auf Open-Source-Komponenten, um eine herstellerunabhängige und kostengünstige Testumgebung für die Gemeinschaft zu schaffen. Durch die Anpassung bestehender Soft-UEs und Soft-gNBs aus dem OpenAirInterface-Projekt sollte eine Brücke geschlagen werden, die es ermöglicht, Simulationsergebnisse mit hoher Konfidenz auf reale Einsatzszenarien zu übertragen.

2.2 Zielgruppe und Anwendungsbereiche

Das Projekt adressiert ein breites Spektrum an Akteuren, die an der Schnittstelle von Robotik und Vernetzung arbeiten. Die primäre Zielgruppe umfasst Robotik-Entwickler:innen und Software-Ingenieur:innen, die komplexe Steuerungsalgorithmen für autonome mobile Roboter (AMR) entwerfen. Für sie bietet RoboSim5G die Möglichkeit, das Verhalten ihrer Systeme bei schwankenden Netzwerkbedingungen oder bei der Nutzung spezialisierter 5G-Features bereits am Schreibtisch zu validieren.

Darüber hinaus richtet sich das Projektergebnis an Systemintegratoren und Industrie-Dienstleister, die Robotik-Use-Cases in ihre 5G-Campusnetze integrieren wollen. Mit den entwickelten Tools können diese bereits vor der Installation physischer Basisstationen und Roboter simulieren, ob die geplante Robotik-5G Integration technisch funktioniert. Auch der Bereich der akademischen Forschung und Lehre profitiert massiv: Universitäten erhalten ein mächtiges, frei verfügbares Werkzeug, um neue Protokolle und Anwendungen im Kontext von „Connected Robotics“ zu erforschen, ohne auf teure Hardware-Testbeds angewiesen zu sein. Schließlich adressiert das Projekt KMUs und Start-ups, denen durch die Bereitstellung als Open Source der Einstieg in die 5G-Technologie erleichtert wird, wodurch Innovationszyklen verkürzt und Entwicklungskosten gesenkt werden.

2.3 Inhaltlicher Überblick über das Projektergebnis

Das zentrale Ergebnis des Projekts ist ein modulares Software-Ökosystem, das die 5G-Kommunikation vollständig in den Gazebo-Simulator integriert. Technisch wurde dies durch die Implementierung von zwei spezialisierten Plugins realisiert. Das gNodeB-Plugin erlaubt es, Basisstationen als Objekte in der Simulationsumwelt zu platzieren und deren Parameter (wie Standort und Sendeeigenschaften) zu definieren. Das UE-Plugin hingegen wird direkt an das Robotermodell gekoppelt und fungiert als virtuelles 5G-Modem.

Ein entscheidender Aspekt des Projektergebnisses ist die nahtlose Anbindung an reale 5G-Core-Netzwerke. Durch die erfolgreiche Integration von OpenAirInterface (OAI), Free5GC und Open5GS wurde sichergestellt, dass die gesamte Signalisierungskette – vom Roboter über die virtuelle Luftschnittstelle bis hin zum Kernnetz – abgebildet wird. Dies ermöglicht erstmals echte Ende-zu-Ende-Tests. Entwickler können somit verifizieren, ob ein Steuerbefehl, der über eine 5G-Network-API ausgelöst wird, die gewünschte Priorisierung im Kernnetz erfährt und welche Auswirkungen dies auf die Latenz des Roboters in der Simulation hat.

Zusätzlich zur Software-Implementierung umfasst das Ergebnis eine umfassende Dokumentation sowie Beispiel-Szenarien. Diese erleichtern den Einstieg in die komplexe Materie der

5G-Kernnetze und zeigen auf, wie QoS-Mechanismen in Gazebo konfiguriert werden. Mit der Veröffentlichung des Quellcodes auf GitHub hat das Projekt eine nachhaltige Basis geschaffen, die über die Förderlaufzeit hinaus von der Community erweitert und genutzt werden kann. Damit steht ein vollständiges Instrumentarium zur Verfügung, um die Vision von „Wireless Robotics“ effizient und realitätsnah in die Praxis umzusetzen.

2.4 Abgrenzung zu Gigabot

Parallel zur Umsetzung von RoboSim5G (gefördert durch netidee) lief das durch die FFG geförderte Projekt „GigaBot“. Da sich beide Projekte thematisch im Bereich der 5G-Robotik bewegen und technologische Synergien nutzen, ist eine transparente Abgrenzung der geförderten Inhalte und Aufwände essentiell.

Fokus des Projekts GigaBot (FFG): Im Zentrum von GigaBot stand die Fernsteuerung eines Roboters für Fertigungshallen sowie die Erstellung eines digitalen Zwillings im 5G-Netz. Für diesen Use-Case wurde das geschlossene *Virtual 5G Lab (V5GL)* entwickelt. Das initiale Gazebo-Plugin kam hierbei zum Einsatz, um den digitalen Zwilling an den spezifischen Anwendungsfall anzupassen. Die Arbeiten in GigaBot beschränkten sich jedoch auf die Integration eines *einzelnen*, spezifischen Roboters in das *eigene* 5G-Netzwerk.

Fokus des Projekts RoboSim5G (netidee): Das netidee-Projekt RoboSim5G zielt hingegen auf die Generalisierung und Veröffentlichung der Technologie für die Allgemeinheit ab. Hierbei geht es um die Integration *beliebiger* Roboter in externe Open-Source-5G-Netzwerke. Die netidee-Förderung deckt spezifisch folgende, über GigaBot hinausgehende Bereiche ab:

- **Open-Source-Transformation:** Code-Refactoring und Veröffentlichung der Plugins (Simulierte gNodeB und UE) unter der Apache License 2.0.
- **Erweiterte Kompatibilität:** Anbindung an die drei großen Open-Source-5G-Kernnetze (OpenAirInterface, Free5GC, Open5GS) anstelle des proprietären V5GL.
- **Neue Features:** Entwicklung von Funktionen, die im GigaBot-Projekt nicht verwendet wurden (z. B. erweiterte Lokalisierungs-Simulationen).
- **Dokumentation & Community:** Erstellung umfassender technischer Setup-Guides für externe Anwender:innen und Entwickler:innen sowie aktives Community-Service.

Vermeidung von Doppelförderung: Die initiale Entwicklung des Gazebo-Plugins war ein integraler Bestandteil des GigaBot-Projekts. Im weiteren Verlauf wurde das Plugin unter dem Namen "RoboSim5G" als Open-Source-Lösung ausgekoppelt. Um jegliche Doppelförderung strikt auszuschließen, wurden die Aufwände klar getrennt dokumentiert. Sämtliche Arbeiten für die Open-Source-Transformation, die Erstellung der Dokumentationen für externe Nutzer:innen

sowie die Integration in die genannten Open-Source-Netzwerke abseits des V5GL wurden nicht über GigaBot, sondern separat über die netidee-Förderung abgewickelt und abgerechnet.

3 Verlauf der Arbeitspakete

3.1 Arbeitspaket 1 - *Detailplanung und Formales am Projektstart*

Arbeitspaket 1 umfasste alle grundlegenden Schritte zum Projektbeginn: Vertragsabschluss, Detailplanung, Erstellung der Projektwebsite, Veröffentlichung des ersten Blogbeitrags sowie die Einreichung des Förderabrufformulars.

Das Arbeitspaket wurde vollständig abgeschlossen. Der Vertrag ist unterzeichnet, die Planung finalisiert, die Projektdetails samt Lizenz- und Veröffentlichungsdetails dokumentiert. Website und Blogpost sind online, die erste Förderrate wurde erfolgreich beantragt und genehmigt.

3.2 Arbeitspaket 2 - *Projektmanagement & Kommunikation*

Aufteilung der Haupttätigkeiten

Die zentralen Aufgaben im Rahmen von Arbeitspaket 2 gliedern sich wie folgt:

- 2.1 Agiles Projektmanagement
- 2.2 Zwischenbericht
- 2.3 Endbericht
- 2.4. Artikel in technik-affinen Medium veröffentlichen

Erkenntnisse zur Vorhergehensweise:

Ursprünglich geplant waren wöchentliche Meetings für dieses Projekt. Die Planung dieses Projekts ist allerdings in die phine.tech-internen Tech Weeklys mit eingeflossen, um einerseits die Anzahl der Meetings zu verringern und andererseits ein Know-How-Exchange im Team zu ermöglichen.

Dasselbe gilt für die Retros. Aus diesem Grund wurden jeweils zweiwöchentliche Planungs- und Reviewmeetings im direkten RoboSim5G Projektteam durchgeführt.

Im letzten Quartal wurden die Weeklys wöchentlich abgehalten, da das Arbeitspaket 4 für Erweiterungen der 5G Funktionen aufgrund von externen Faktoren vom eigentlichen Plan abgewichen werden musste.

Aktueller Fortschritt:

Alle Aufgaben wurden zu 100% abgeschlossen.

Besondere Erfolge und Herausforderungen

Durch die agile Planung konnte die erste Projektphase trotz sehr hoher technischer Komplexität erfolgreich abgeschlossen werden.

Das Projekt wurde sowohl auf 5G-Konferenzen als auch im Rahmen von Erst-Terminen mit potenziellen Industriepartnern präsentiert. Hierbei wurde RoboSim5G erfolgreich als Brückentechnologie vorgestellt, die den Einstieg in die 5G-Robotik für Unternehmen massiv vereinfacht und beschleunigt. (siehe Kapitel 6).

Abweichungen vom ursprünglichen Plan

Das Projekt wurde technisch erst im Februar gestartet, da das Dienstverhältnis des essentiellen Mitarbeiters Riccardo Belletti erst Mitte Jänner gestartet hat. Die ersten zwei Wochen waren Einarbeitungszeit im Rahmen des Gigabot-Projekts, weshalb kein Aufwand im RoboSim5G Projekt gebucht wurde.

Der geplante Fachartikel in einem technikaffinen Medium verzögerte sich wegen Verschiebungen bei der Plugin-Entwicklung. Der Artikel wurde am 03.04.2026 auf Medium veröffentlicht:
<https://medium.com/@riccardo.belletti/how-to-simulate-real-world-5g-for-robots-a-deep-dive-in-to-robosim5g-2e3b036a64f4?postPublishedType=initial>

Im Zuge des Projektmanagements wurde der offizielle Projektabschluss in Absprache mit netidee auf Ende März 2026 verschoben. Diese zeitliche Anpassung war notwendig, da die Umsetzung wesentlicher Teile von Arbeitspaket 4 auf den Ergebnissen des parallel laufenden FFG-Projekts „GigaBot“ aufbaute.

Trotz der verlängerten Laufzeit konnte die zugrundeliegende 5G-Lokalisierungsfunktion (Location Management Function, LMF) im GigaBot-Projekt bedauerlicherweise nicht finalisiert werden. Der Grund hierfür war, dass das GigaBot-Projekt selbst auf eine externe Open-Source-Implementierung dieser Lokalisierungsfunktion angewiesen war. Da eine solche Open-Source-Lösung jedoch wider Erwarten von der Community nicht bereitgestellt wurde, fehlte die technologische Basis. Infolge dieser Verkettung externer Abhängigkeiten konnte die entsprechende Open-Source-Integration für die LMF-Funktion leider auch innerhalb von RoboSim5G nicht wie ursprünglich geplant abgeschlossen werden. Eine detaillierte Erläuterung der technischen Hintergründe und der Auswirkungen auf die Feature-Entwicklung findet sich in Kapitel 3.4 (Erweiterung der 5G-Funktionen).

3.3 Arbeitspaket 3 - *Entwicklung des 5G-Plugins für Gazebo*

Aufteilung der Haupttätigkeiten

Die zentralen Aufgaben im Rahmen von Arbeitspaket 3 gliedern sich wie folgt:

- 3.1 Analyse der technischen Anforderungen für die Integration von 5G in Gazebo
- 3.2 Entwicklung der technischen Architektur
- 3.3 Implementierung der simulierten gNodeB und UE als Gazebo-Plugins
- 3.4 Anbindung der simulierten Geräte an Open-Source-5G-Netzwerke
- 3.5 Durchführung von End-to-End-Tests und Plugin-Debugging

Erkenntnisse zur Vorgehensweise

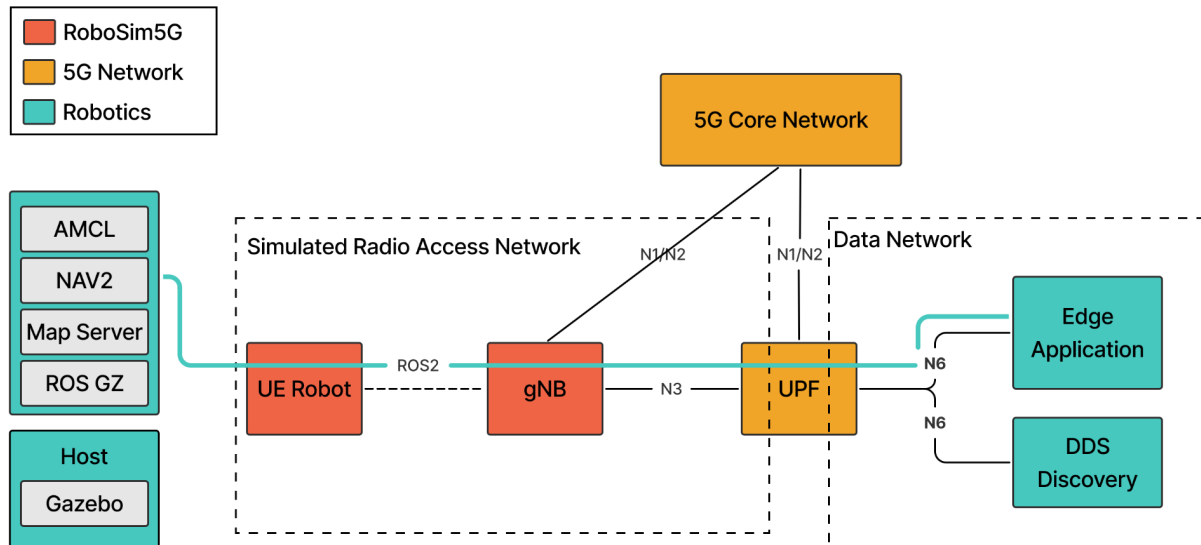
Trotz eines fundierten Verständnisses der Problemstellung und einer klaren technischen Vision wurde der zeitliche Aufwand unterschätzt. Die wesentliche Erkenntnis: In hochkomplexen Systemlandschaften - wie etwa Robotik oder 5G - und insbesondere bei deren Integration, sollten deutlich größere zeitliche Puffer für technische Herausforderungen eingeplant werden.

Aktueller Fortschritt

Alle Aufgaben wurden zu 100% abgeschlossen.

Besondere Erfolge und Herausforderungen

Die größte technische Herausforderung bestand darin, die ROS-basierte (Robot Operating System) Kommunikation mit den Spezifikationen von 5G-Netzwerken in Einklang zu bringen. Da ROS standardmäßig auf Multicast-Verfahren setzt, diese jedoch von aktuellen Open-Source 5G-Implementierungen nicht unterstützt werden, mussten wir die Kommunikationsarchitektur grundlegend anpassen. Die Lösung wurde durch den Einsatz eines speziell für 5G optimierten DDS-Discovery-Servers realisiert. Eine besondere Komplexität lag dabei in der selektiven Datenführung: Während die geschäftskritische Kommunikation zwischen Roboter und Edge-Applikation realistisch über den 5G-Stack simuliert wird, verbleibt der Datenaustausch zwischen Roboter und Gazebo-Physikengine lokal, um die Simulationsintegrität zu wahren. Damit hat sich RoboSim5G von einem reinen Plugin zu einem umfassenden Framework für Robotik entwickelt. Das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten innerhalb dieses Frameworks, von der Simulationsumgebung Gazebo bis hin zum 5G-Kernnetz, wird in der nachfolgenden Abbildung schematisch dargestellt.



Ein bemerkenswerter Erfolg war die parallele Bearbeitung: Trotz technischer Herausforderungen im UE-Plugin konnten wir mit der Entwicklung des gNodeB-Plugins planmäßig starten. Gleichzeitig wurde kontinuierlich an der Problemlösung für das UE-Plugin gearbeitet.

Die detaillierte Architekturplanung in regelmäßigen Meetings ermöglichte eine strukturierte Umsetzung und reduzierte die spätere Entwicklungszeit des UE-Plugins. Dadurch wird sich die Verzögerung des gesamten Arbeitspakets voraussichtlich im Rahmen halten.

Einen weiteren wesentlichen technischen Erfolg gab es in der Phase der Netzwerkanbindung (Aufgabe 3.4): die Implementierung eines hybriden Netzwerkansatzes zur Realisierung von Ende-zu-Ende Quality-of-Service (QoS). Die Notwendigkeit dieser Architektur ergab sich aus den komplementären Stärken der verfügbaren Stacks: Während die User Plane Function (UPF) von OpenAirInterface (OAI) dank ihrer eBPF-Basis eine exzellente physische Durchsetzung (Enforcement) von QoS-Regeln ermöglicht, fehlen dem restlichen OAI-Core bisher essenzielle Standard-APIs für ein dynamisches QoS-Management. Im Gegensatz dazu bietet free5GC eine sehr ausgereifte, benutzerfreundliche und standardkonforme Control Plane inklusive der nötigen Schnittstellen, stößt jedoch bei der tatsächlichen Durchsetzung auf der Datenebene an Grenzen.

Durch die gezielte Kombination der free5GC Control Plane mit der performanten OAI-UPF konnten wir beide Welten vereinen. Dieser hybride Stack ermöglicht es, Priorisierungen für kritische Roboter-Steuerbefehle über Standard-APIs dynamisch anzufordern und innerhalb der Simulation physikalisch wirksam werden zu lassen. Damit wurde eine Testumgebung geschaffen, die nicht nur die Konnektivität, sondern auch das reale, dynamische Verkehrsmanagement eines 5G-Campusnetzes präzise abbildet.

Die Arbeit mit Open5GS und free5GC zeigte deutliche Unterschiede in den Netzwerkstrukturen auf; diese Erkenntnisse haben wir genutzt, um die Schwachstellen in der Verwendbarkeit unserer Plugins zu beheben und das System so weit zu optimieren, dass künftige Erweiterungen nun deutlich nahtloser erfolgen können.

Abweichungen vom ursprünglichen Plan

Die Architekturplanung erwies sich als deutlich komplexer als ursprünglich angenommen. Technische Hürden führten zu einer erheblich höheren Komplexität in der Plugin-Entwicklung. Infolgedessen wurde zunächst ausschließlich die gNodeB-Komponente geplant und umgesetzt. Parallel dazu wurden im Rahmen interner Besprechungen Optionen für das UE-Plugin evaluiert.

Während im Zwischenbericht aufgrund technischer Spezifika noch eine vorläufige Beschränkung auf OpenAirInterface (OAI) kommuniziert wurde, konnte dieser Rückstand im weiteren Projektverlauf vollständig aufgeholt werden. Durch eine Anpassung der internen Timeline wurden Open5GS und free5GC erfolgreich integriert. Damit ist die Aufgabe 3.4 des Arbeitspaket 3 nun vollumfänglich und ohne Abstriche beim Funktionsumfang abgeschlossen, was die Interoperabilität von RoboSim5G mit den wichtigsten Open-Source 5G Cores sicherstellt

3.4 Arbeitspaket 4 - Erweiterung der 5G-Funktionen

Aufteilung der Haupttätigkeiten:

Zu den Haupttätigkeiten von Arbeitspaket 4 gehören folgende Punkte:

- 4.1 geplant: Lokalisierung: Refactoring, Sicherstellung der Kompatibilität und Weiterentwicklung
- 4.1 umgesetzt: Network Monitor Plugin
Entwicklung eines GUI-Plugins für Gazebo zur automatisierten Echtzeit-Überwachung von Netzwerklatenz und Bandbreite (Ping und iperf3) über den simulierten 5G-Link.
- 4.2 QoS: Refactoring, Sicherstellung der Kompatibilität und Weiterentwicklung
- 4.3 Erstellung von Integrationstests zur Validierung der Funktionalität.
- 4.4 Validierung der erweiterten 5G-Funktionen durch simulierte Robotik-Szenarien.

Erkenntnisse zur Vorgehensweise:

Die strikte Containerisierung (via Docker Compose für den 5G Core und die Simulation) erwies sich als essenziell, um reproduzierbare Testumgebungen zu schaffen. Es hat sich gezeigt, dass die direkte Steuerung von Netzwerkfunktionen aus der Gazebo-GUI – anstelle von manuellen Terminal-Befehlen – den Workflow für Entwickler:innen massiv beschleunigt. Besonders bei der Validierung, wie ROS 2-Control-Loops auf Netzwerkeinschränkungen reagieren, ist diese nahtlose Integration von unschätzbarem Wert.

Aktueller Fortschritt:

Das Arbeitspaket ist unter Berücksichtigung der unten genannten Planabweichungen abgeschlossen. Die CI-Pipeline ist voll operativ und führt bei Fehlern automatisch Log-Dumps (AMF, Simulation, gNB, UE) zur schnellen Fehlerbehebung durch, bevor die Umgebung sauber heruntergefahren wird (Clean Teardown). Die entwickelten Plugins für Network-Monitoring und Power-Control sind erfolgreich in Gazebo integriert und voll funktionsfähig.

Aufgrund des Nicht-Ereichens der Lokalisierungsfunktion ist der aktuelle Fortschritt im Vergleich zum ursprünglichen NetIdee Antrag 80%.

Besondere Erfolge und Herausforderungen:

Ein besonderer Erfolg war die Implementierung der „Power Control Plugins“. Diese machen es nicht nur extrem einfach, Konfigurationsversionen fliegend zu wechseln, sondern ermöglichen auch gezieltes *Failure Testing*. Das bewusste Simulieren von Verbindungsabbrüchen („Network Dropouts“) erlaubt es nun, die Robustheit des Navigations-Stacks eines Roboters bei Netzwerkverlust realistisch zu testen.

Die Orchestrierung der verschiedenen Netzwerke (Simulation und 5G Core) im End-to-End-Test sowie das Sicherstellen der erfolgreichen gNB- und UE-Registrierung an der AMF innerhalb strikter Timeouts stellten technisch komplexe Herausforderungen dar, die durch den automatisierten CI-Workflow erfolgreich gelöst wurden.

Abweichungen vom Plan:

Ursprünglich war in diesem Arbeitspaket die Integration der 5G-Lokalisierung geplant. Die Idee sah vor, Standard-5G-APIs einer *Location Management Function* (LMF) aus Gazebo heraus abzufragen und als ROS-Topic (z.B. für RViz) bereitzustellen. Wie bereits in Kapitel 3.2 erwähnt, war dieses Feature stark von den Ergebnissen des GigaBot-Projekts sowie der Verfügbarkeit einer externen Open-Source-Implementierung abhängig. Da die Open-Source-Community eine solche LMF nicht zur Verfügung stellte, konnte dieses Feature nicht realisiert werden. Dieser Teil des Arbeitspakets wurde daher aus dem aktuellen Projekt gestrichen. Das Thema 5G-Lokalisierung wird nun in nachfolgenden, separaten Projekten weiterverfolgt (siehe Kapitel 8).

3.5 Arbeitspaket 5 - *Erstellung und Veröffentlichung der Dokumentation*

Aufteilung der Haupttätigkeiten

Die zentralen Aufgaben im Rahmen von Arbeitspaket 5 gliedern sich wie folgt:

- 5.1 Dokumentation der Plugins
- 5.2 Dokumentation der 5G-Netze
- 5.3 Erweiterung der Plugin-Dokumentation
- 5.4 Interne Qualitätsprüfung
- 5.5 E2E-Tests auf Basis der Dokumentation

Erkenntnisse zur Vorhergehensweise:

Die Entscheidung, die Dokumentation als eigenes Arbeitspaket zu führen, erwies sich als goldrichtig. In der Schnittmenge von 5G-Telekommunikation und 3D-Robotiksimulation ist die Komplexität so hoch, dass eine oberflächliche Beschreibung nicht ausgereicht hätte. Die Dokumentation musste als Brücke fungieren, die es Robotik-Entwickler:innen ohne tiefes Telco-Wissen ermöglicht, ein funktionierendes 5G-System aufzusetzen.

Aktueller Fortschritt:

Alle Aufgaben wurden zu 100% abgeschlossen.

Besondere Erfolge und Herausforderungen

Die größte Herausforderung in diesem Arbeitspaket bestand darin, die hochkomplexen technischen Setups der drei unterschiedlichen 5G-Kernetze sowie den hybriden QoS-Ansatz für Anwender:innen ohne tiefgreifende Telekommunikations-Expertise verständlich aufzubereiten. Es gelang uns, die spezifischen Konfigurationsunterschiede zwischen Open5GS, free5GC und OAI so transparent zu machen, dass Nutzer:innen die für ihren Anwendungsfall optimale Core-Variante wählen können.

Ein wesentlicher praktischer Erfolg war zudem die Bereitstellung dedizierter Start-Skripte für jedes der unterstützten Core-Netzwerke. Diese automatisieren die Orchestrierung der Netzwerkkomponenten sowie der Robotersimulation vollständig, sodass Anwender:innen unmittelbar über eine lauffähige Instanz verfügen. Dies ermöglicht eine sofortige Analyse der Systemdynamiken und senkt die Hemmschwelle für eigene Experimente massiv. Die Dokumentation stellt somit sicher, dass die technischen Innovationen, insbesondere die komplexe Kopplung von free5GC und der OAI-UPF, für die Open-Source-Community nicht nur theoretisch nachvollziehbar, sondern als interaktive Testumgebung direkt einsetzbar sind.

Abweichungen vom Plan:

Die im Zwischenbericht angeführten Rückstände bei der Dokumentation wurden im Zuge der Finalisierung von AP 3 vollständig aufgeholt. Nach dem erfolgreichen Abschluss des internen Review-Prozesses liegt nun die vollständige technische Dokumentation für das UE-Plugin vor. Ebenso wurden die Setup-Guides für alle drei unterstützten Open-Source-5G-Kernetze (OpenAirInterface, Open5GS und free5GC) fertiggestellt und im Projekt-Repository veröffentlicht, womit dieser Bereich nun vollumfänglich abgeschlossen ist.

3.6 Arbeitspaket 6 - *Community-Integration und Open-Source-Arbeit*

Aufteilung der Haupttätigkeiten

Die zentralen Aufgaben im Rahmen von Arbeitspaket 6 gliedern sich wie folgt:

- 6.1 Einrichtung der Projektinfrastruktur (Git-Repository)
- 6.2 Entwicklung von Coding Guidelines
- 6.3 Einrichtung und Wartung von CI/CD
- 6.4 Aufbau interner Kommunikationskanäle
- 6.5 Kommunikation und Austausch mit der Community

Erkenntnisse zur Vorgehensweise:

Die strukturelle Verankerung der Community-Arbeit in einem dedizierten Arbeitspaket erwies sich als maßgeblicher Erfolgsfaktor, um diesem Aspekt auch unter hohem technischem Ressourcendruck die nötige Priorität einzuräumen. Erfahrungsgemäß besteht bei komplexen Softwareprojekten das Risiko, den Aufbau externer Kommunikationsstrukturen zugunsten technischer Entwicklungsaufgaben hintanzustellen. Durch die formelle Einplanung wurde dieser Tendenz proaktiv entgegengewirkt und sichergestellt, dass frühzeitig ein niederschwelliger Zugang für externe Entwickler:innen geschaffen wird – eine absolute Grundvoraussetzung für die langfristige Etablierung und Akzeptanz der Open-Source-Lösung.

Durch die rechtzeitige Bereitstellung klarer Kontaktmöglichkeiten haben wir sichergestellt, dass das Framework für externe Impulse jederzeit anschlussfähig bleibt. Diese Vorbereitung ist notwendig, damit potenzielles Interesse aus der Community nicht an unklaren Strukturen scheitert, sondern direkt in eine erfolgreiche Zusammenarbeit fließen kann.

Aktueller Fortschritt:

Alle Aufgaben wurden zu 100% abgeschlossen.

Besondere Erfolge und Herausforderungen

Ein messbarer Beleg für die internationale Relevanz von RoboSim5G ist das aktive Interesse aus der Wissenschaft. Konkrete Erstkontakte mit Studenten der University of Cape Town (UCT) sowie der Hochschule Offenburg, die das Framework für Forschungsarbeiten in den Bereichen Raytracing und Lokalisierung nutzen und erweitern möchten, unterstreichen, dass das Projekt globale Forschungslücken schließt. Ein weiterer Erfolg ist die enorme Reichweite, die durch Präsentationen auf dem Mobile World Congress 2026 in Barcelona sowie auf Events in Seoul und Kista erzielt wurde.

Abweichungen vom Plan:

Die im Zwischenbericht angeführten Verzögerungen bei der internen Prüfung und Veröffentlichung des Source Codes sowie der Dokumentation konnten in der zweiten Projekthälfte vollständig kompensiert werden. Sämtliche Quellcodes wurden einem internen Review-Prozess unterzogen und stehen nun, zusammen mit den entsprechenden Coding-Guidelines, öffentlich zur Verfügung.

4 Liste Projektergebnisse

1	Projektzwischenbericht	CC BY 4.0	https://www.netidee.at/RoboSim5G
2	Projektendbericht	CC BY 4.0	https://www.netidee.at/RoboSim5G
3	Entwickler_innen-DOKUMENTATION	CC BY 4.0	https://www.netidee.at/RoboSim5G
4	Anwender_innen-DOKUMENTATION	CC BY 4.0	https://www.netidee.at/RoboSim5G
5	Veröffentlichungsfähiger Einseiter / Zusammenfassung	CC BY 4.0	https://www.netidee.at/RoboSim5G
6	Dokumentation Externkommunikation zur Erreichung Sichtbarkeit /Nachhaltigkeit	CC BY 4.0	https://www.netidee.at/RoboSim5G (Teil des Endberichts)
7	Simulierte gNodeB als Gazebo PlugIn Ein Simuliertes UE (Smartphone oder 5G Modem für Roboter) soll in Gazebo hinzugefügt werden können und sich über einer simulierten gNodeB in Gazebo zu einem 5G Core Network verbinden können.	Apache License 2.0	https://github.com/phin etech/RoboSim5G
8	Simuliertes UE (User Equipment) als Gazebo PlugIn Ein Simuliertes UE (Smartphone oder 5G Modem für Roboter) soll in Gazebo hinzugefügt werden können und sich über einer simulierten gNodeB in Gazebo zu einem 5G Core Network verbinden können.	Apache License 2.0	https://github.com/phin etech/RoboSim5G

9	<p>Dokumentation zur Verwendung mit den drei größten Open-Source 5G Core Networks</p> <p>Eine Dokumentation, wie man die jeweiligen 5G Core Networks startet und wie man unser Gazebo Plugin damit verbindet. Eine Dokumentation jeweils für OpenAirInterface, Free5GC und Open5GS.</p>	Apache License 2.0	https://github.com/phinetech/RoboSim5G
10	<p>QoS-Erweiterung für simulierte gNodeB und QoS</p> <p>Als technologisch wertvolle Alternative zur entfallenen Lokalisierung wurde der Entwicklungsfokus auf das Thema Quality of Service gelegt. In diesem Zuge wurde eine umfassende QoS-Erweiterung für die simulierte gNodeB (Basisstation) implementiert sowie ein leistungsstarkes QoS-Plugin für Gazebo entwickelt. Dieses ermöglicht es Entwickler:innen, Netzwerkeigenschaften, Priorisierungen und QoS-Parameter direkt in der Simulationsoberfläche interaktiv zu testen und zu validieren.</p>	Apache License 2.0	https://github.com/phinetech/RoboSim5G
11	<p>Abgrenzung zu GigaApp Projekt (Gigabot)</p> <p>Da zeitgleich eine Förderung durch das Gigabot-Projekt besteht und beide Projekte voneinander profitieren, wird transparent darlegt, welche Inhalte jeweils gefördert werden. Die Beschreibung wird dem Projektendbericht beigefügt.</p> <p>Gigabot: Eine Integration eines Roboters in ein spezifisches 5G Netz</p> <p>NetIdee: Integrationen beliebiger Roboter in 3 Open source 5G Netze, Dokumentation, OSS Code Updates, Community Service</p>	CC BY 4.0	https://www.netidee.at/RoboSim5G (Teil des Endberichts)

5 Verwertung der Projektergebnisse in der Praxis

Die Verwertung der Ergebnisse des RoboSim5G-Projekts erfolgt auf zwei zentralen Ebenen: der direkten wirtschaftlichen und strategischen Nutzung durch die phine.tech GmbH sowie der technologischen Weiternutzung im Kontext zukünftiger Netzwerkgenerationen (6G).

Wirtschaftliche Verwertung und strategische Positionierung Für die phine.tech GmbH fungiert das erfolgreich abgeschlossene Open-Source-Projekt als idealer, reichweitenstarker Marketingkanal. Die Kernkompetenz des Unternehmens – die komplexe technologische Verknüpfung von 5G-Telekommunikation und Robotik – wird durch RoboSim5G für eine breite Zielgruppe greifbar und anwendbar gemacht. Durch die Bereitstellung dieses hochwertigen Tools etabliert phine.tech einen starken, nachhaltigen „Footprint“ in der globalen Open-Source-Robotik-Community. Dies senkt die Hemmschwelle für B2B-Kontakte erheblich und dient als optimaler Türöffner, um mit internationalen Unternehmen und Entscheidungsträgern aus dem industriellen Robotik- und Automatisierungssektor in einen qualifizierten geschäftlichen Austausch zu treten.

Technologische Praxisrelevanz und der Weg zu 6G Abseits der direkten kommerziellen Sichtbarkeit besitzt das Projekt eine enorme technologische Praxisrelevanz, die bereits heute den Weg für zukünftige Innovationen ebnet – insbesondere im Hinblick auf den kommenden 6G-Standard und moderne Radio Access Networks (RAN).

Große Branchenakteure treiben die netzwerktechnische Forschung aktuell massiv voran, beispielsweise NVIDIA mit dem Open-Source-Raytracing-Tool „Sionna“. An dieser Stelle bietet RoboSim5G eine perfekte technologische Synergie und Ausgangsbasis für die Praxis: Für die Robotiksimulation in Gazebo müssen ohnehin detaillierte 3D-Modelle der Umgebung (wie etwa komplexe industrielle Fertigungshallen) erstellt werden. Diese bestehenden 3D-Geometrien lassen sich aus Gazebo exportieren und direkt in Tools wie NVIDIA Sionna integrieren, um hochpräzise Raytracing-Kanalmodellierungen durchzuführen. Die Ergebnisse aus RoboSim5G schlagen somit eine direkte, in der Praxis hochrelevante Brücke zwischen physischer Robotiksimulation und der hochkomplexen HF-Netzwerksimulation der nächsten Generation.

6 Öffentlichkeitsarbeit/ Vernetzung

6.1 Kommunikation und Publikationen

Die Berichterstattung auf dem netidee-Blog wurde über die gesamte Projektlaufzeit intensiviert, sodass zum Abschluss insgesamt fünf Beiträge zu Fortschritten und technischen Details vorliegen. Wie geplant, wurden diese durch gezielte LinkedIn-Postings sowie die Veröffentlichung eines

Fachartikels in einem technikaffinen Medium ergänzt, um die Sichtbarkeit des Projekts in der Fach-Community weiter zu erhöhen.

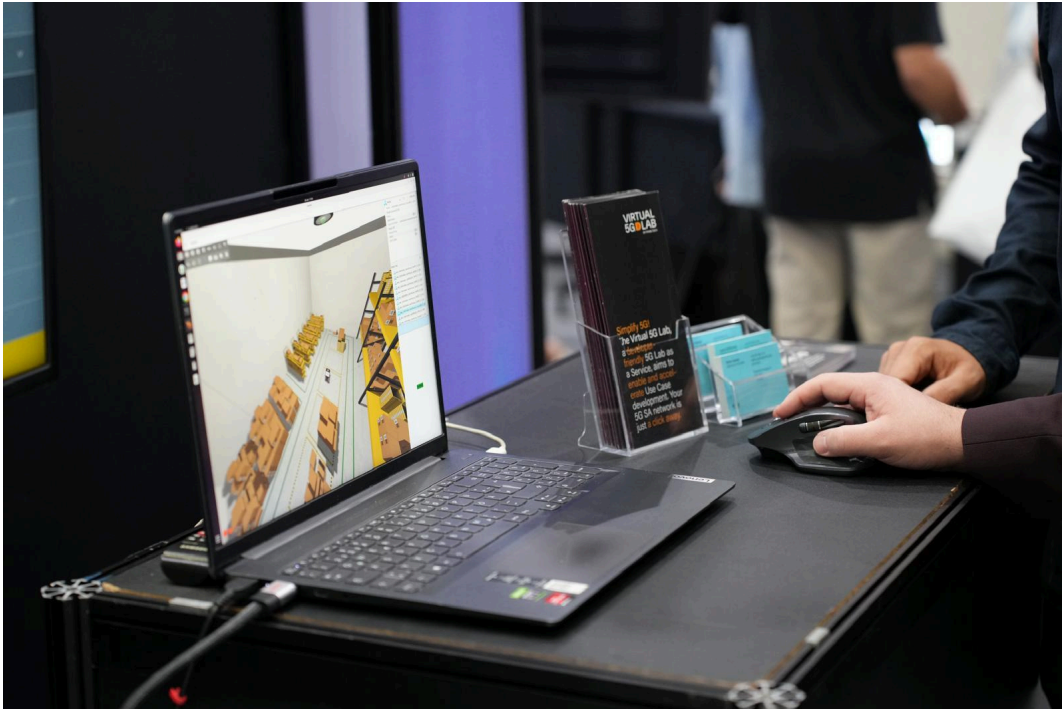
6.2 Fachliche Vernetzung und Events

Die fachliche Vernetzung und der Austausch mit der Community wurden durch die Teilnahme an mehreren internationalen Veranstaltungen vorangetrieben. Bereits in der ersten Projekthälfte wurde RoboSim5G beim OAI Summer Workshop in Kista (Schweden) sowie bei der Nextrise Startup Messe in Seoul (Südkorea) erfolgreich präsentiert.

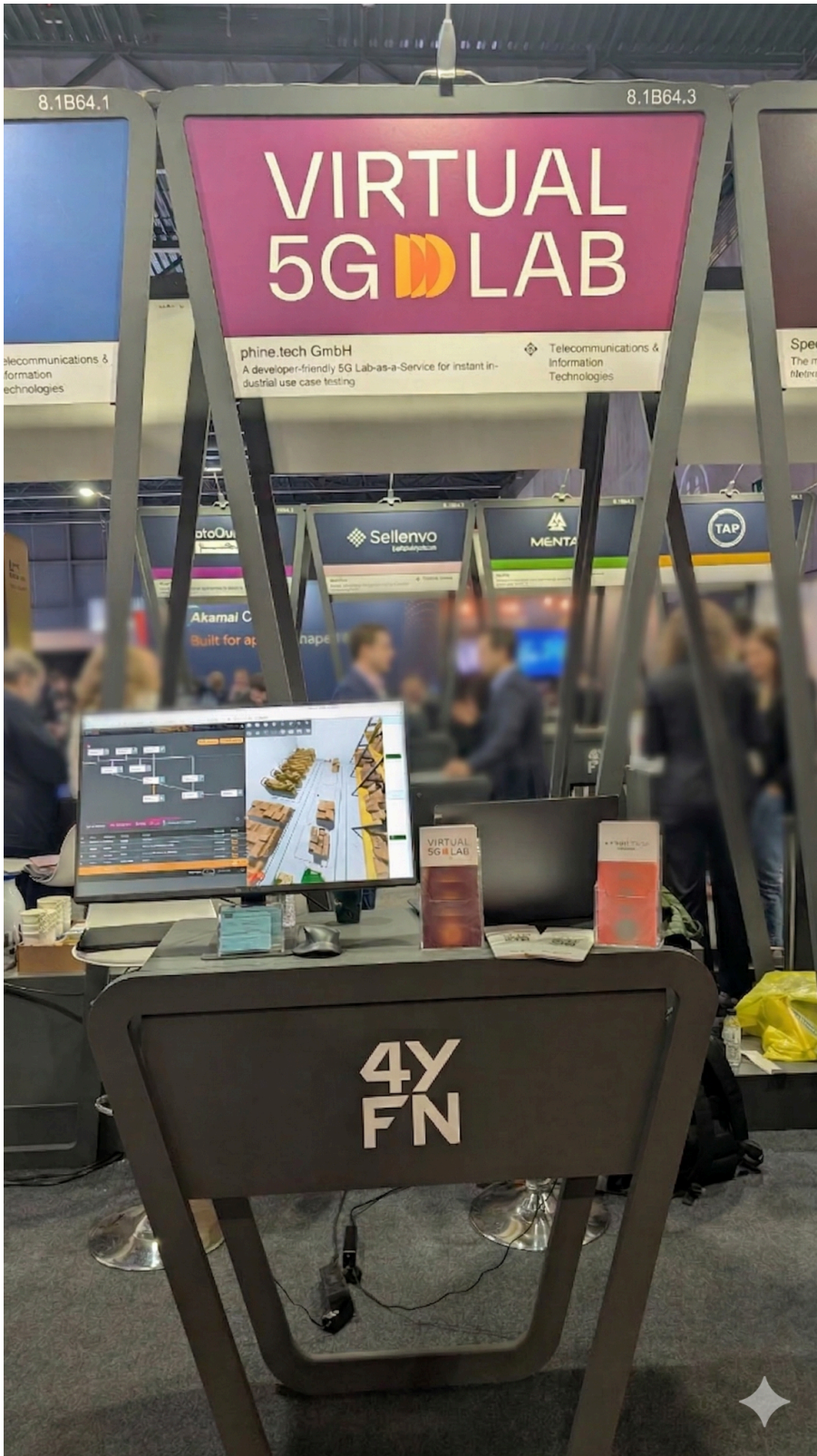
Ein zentraler Meilenstein der Vernetzung war schließlich die Präsentation von RoboSim5G auf dem Mobile World Congress 2026 in Barcelona. Diese internationale Bühne ermöglichte einen intensiven Austausch mit globalen Akteuren der Mobilfunkbranche und bestätigte das hohe Interesse an 5G-Robotik-Lösungen. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen zeigt sich auch im akademischen Bereich: Ein Student der University of Cape Town (UCT) und ein Student der Hochschule Offenburg haben im Rahmen eines Erstkontakts Interesse bekundet, im Zuge einer Forschungsarbeit zu den Themen Lokalisierung und Raytracing zur Weiterentwicklung des Frameworks beizutragen.



Die Gründer von phine.tech, Lukas Rotheneder (CTO) und Stefan Spettel (CEO) bei der Präsentation des RoboSim5G Projekts gemeinsam mit Virtual 5G Lab bei der Innovationskonferenz Nextrise in Seoul im Juni 2025.



RoboSim5G-Plugin direkt in Gazebo



Präsentation des RoboSim5G Projekts am Mobile World Congress / 4 Years From Now in Barcelona im März 2026

6.3 Zukünftige Aktivitäten

Nach Projektende wird RoboSim5G weiterhin aktiv auf Messen präsentiert, wobei der Fokus verstärkt auf Logistik-Fachmessen liegen wird, da das Thema Private 5G in diesem Sektor zur Vernetzung autonomer Systeme massiv an Bedeutung gewinnt. Zudem ist das Framework nun fester Bestandteil der Unternehmenspräsentation von phine.tech, um potenziellen Partnern aus der Robotik und Logistik die Vorteile einer Ende-zu-Ende-Validierung praxisnah aufzuzeigen.

7 Eigene Projektwebsite

Neben der netidee Projekt Website wird noch eine eigene Projektseite auf der phine.tech Website betrieben.

Seit dem Zwischenbericht wurde unser Webauftritt im Rahmen einer Marken-Neuausrichtung nicht nur optisch erneuert, sondern auch inhaltlich deutlich ausgebaut.

Bitte beachten Sie, dass die Seite nun unter einer neuen URL erreichbar ist:

<https://phine.tech/products/robosim>

8 Geplante Aktivitäten nach netidee-Projektende

Das Projekt RoboSim5G markiert für phine.tech keinen Abschluss, sondern bildet das Fundament für unsere langfristige Strategie im Bereich der vernetzten Robotik. Da die Robotik unser wichtigster vertikaler Zielmarkt ist, werden die Ergebnisse von RoboSim5G kontinuierlich weitergepflegt und ausgebaut.

8.1 Erweiterung der Schnittstellen: Die Application Function (AF)

Ein zentraler Baustein, der sich aktuell in der Fertigstellung befindet, ist die Entwicklung einer eigenen Application Function (AF). Diese dient als intelligente Schnittstelle zwischen dem 5G-Kernnetz und externen Software-Applikationen.

Open Source Commitment: Nach der Fertigstellung werden wir diese AF als Open Source Software veröffentlichen und direkt in die vorgefertigten 5G-Setups von RoboSim5G integrieren.

Funktionsumfang: Im ersten Schritt unterstützt die AF den Standard Quality on Demand (QoD). Dies ermöglicht es Robotik-Anwendungen, je nach Bedarf höhere Priorisierungen oder garantierte Bandbreiten im Netzwerk anzufordern. (QoS ist bereits integriert, QoD ist ein "Upgrade" um QoS per API call dynamisch zu verändern).

Es werden weitere Network-APIs (orientiert am CAMARA-Standard) implementiert, um den Funktionsumfang von RoboSim5G stetig zu erweitern und die Interaktion zwischen Roboter und Netz noch tiefgreifender zu simulieren.

8.2 Realitätsnahe Funkplanung: Konfigurierbare Channel Models

Basierend auf dem wertvollen Feedback, das wir auf zahlreichen Events sammeln konnten, identifizierten wir die Konfigurierbarkeit von Channel Models als das am häufigsten nachgefragte Feature.

Ein Channel Model beschreibt mathematisch, wie sich Funksignale in einer bestimmten Umgebung ausbreiten – unter Berücksichtigung von Effekten wie Dämpfung durch Wände, Signalreflexionen oder Interferenzen. Bisher ist der 5G-Stack in RoboSim5G vollständig integriert, nutzt jedoch standardisierte Übertragungsparameter. Die Implementierung konfigurierbarer Channel Models ist unser nächster technischer Schritt.

Aktuell nutzt RoboSim5G statische Kanalmodelle. Theoretisch bestünde die Möglichkeit, diese über APIs (z.B. via Telnet in OpenAirInterface) basierend auf der Roboterposition zu aktualisieren, was in der Praxis jedoch sehr ineffizient und fehleranfällig ist. Durch neuere Entwicklungen im Bereich Raytracing-Tools, wie beispielsweise NVIDIA Sienna, ergibt sich hier ein massives Weiterentwicklungspotenzial: Ein zukünftiger Ansatz besteht darin, Raytracing zu nutzen, um die Kanalimpulsantwort dynamisch auf Basis der Roboterposition und der geometrischen Gegebenheiten der Gazebo-Simulation zu berechnen. Dies würde realistische 5G-Lokalisierungstests ermöglichen – beispielsweise die exakte Simulation von Signalabschattungen durch Metallobjekte (Shadowing), was in realen Fertigungshallen ein häufiges und kritisches Problem darstellt. Da dies den Rahmen dieser Netidee-Förderung bei überstiegen hätte, werden wir diese Technologie in einem separaten Zukunftsprojekt weiterverfolgen, um die Lücke zwischen Simulation und Realität weiter zu schließen.

8.3 Eigenentwicklung einer LMF im Projekt „LUMEIK-5G“ und mmWave-Integration

Da die Open-Source-Community bis dato keine ausgereifte Location Management Function (LMF) bereitstellt, wird phine.tech dieses Problem aktiv angehen. Im Rahmen des parallel anlaufenden FFG-geförderten Projekts "LUMEIK-5G" (<https://phine.tech/services/lumeik>) wird eine eigene LMF entwickelt. Es ist strategisch eingeplant, diese neu entwickelte LMF in RoboSim5G zu integrieren, um die End-to-End simulierte 5G-Lokalisierung ausgiebig testen und visualisieren zu können. Zudem liegt ein starker Fokus des LUMEIK-5G Projekts auf der Nutzung von mmWave-Frequenzen. Dies stellt eine äußerst interessante und wertvolle zukünftige Erweiterung für das

RoboSim5G-Plugin dar, um auch hochfrequente, industrielle 5G-Szenarien akkurat abbilden zu können.

8.4 Strategische Integration und Marktauftritt

RoboSim5G ist für uns weit mehr als ein reines Simulationswerkzeug; es ist die entscheidende Schnittstelle zu unserer Zielgruppe der Robotik-Entwickler:innen.

Virtual 5G Lab (V5GL): Unser Kernprodukt, das Virtual 5G Lab, zielt darauf ab, die Entwicklung von 5G Use Cases massiv zu vereinfachen. RoboSim5G fungiert hierbei als das perfekte "Front-End".

Synergieeffekte: Wir setzen die Kombination aus RoboSim5G und dem V5GL bereits heute auf Messen und Events ein. Dort demonstrieren wir live, wie effizient ein kompletter 5G-Robotik-Use-Case von der ersten Idee bis zum harten Test unter realistischen Bedingungen entwickelt werden kann.

Durch die dauerhafte Pflege des Open-Source-Repositorys und die enge Verzahnung mit unseren kommerziellen Angeboten stellen wir sicher, dass die im Rahmen der netidee-Förderung geschaffenen Werte nachhaltig wachsen und die Robotik-Community langfristig unterstützen.

9 Anregungen für Weiterentwicklungen durch Dritte

Das durchgängige Konzept von RoboSim5G bietet eine ideale architektonische Grundlage für externe Entwickler:innen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen. Durch die Veröffentlichung ergeben sich vielseitige Nutzungs- und Weiterentwicklungsmöglichkeiten, die weit über den aktuellen Projektfokus hinausgehen:

- **Erweiterung um zusätzliche Kommunikationstechnologien:** Durch den engen Austausch mit der Open-Source-5G/6G-Community kristallisierte sich neben der Kanalmodellierung (Channel Modeling) ein weiteres großes Bedürfnis heraus: die Simulation zusätzlicher Netzwerkstandards. Externe Entwickler:innen könnten das Plugin nutzen, um neben 5G auch andere Kommunikationstechnologien wie WLAN (Wi-Fi 6/7) oder TSN (Time-Sensitive Networking) zu integrieren. Obwohl dies aktuell nicht auf der Roadmap von phine.tech liegt, bietet dieser Ansatz für Dritte das enorme Potenzial, RoboSim5G zu einem ganzheitlichen, technologieübergreifenden Planungstool für smarte Fertigungshallen auszubauen.
- **Hohe Adaptierbarkeit für individuelle Use-Cases:** Ein zentraler Nutzen für die Community liegt in der modularen Nutzbarkeit. Externe Anwender:innen können die im öffentlichen Repository bereitgestellte Demo-Umgebung mühelos austauschen. Eigene

Robotermodelle und spezifische 3D-Welten lassen sich hochdynamisch an die eigenen Gegebenheiten anpassen. Dass diese Architektur auch in der Praxis mit völlig anderen Robotern und weitaus komplexeren Simulationswelten funktioniert, haben wir bereits im parallel laufenden FFG-Projekt „GigaBot“ erfolgreich validiert.

- **Simulation von Netzwerkeinflüssen über Gazebo-Konfigurationen:** Ein massiver Mehrwert für Dritte ist die geschaffene Möglichkeit, die Konfiguration der Basisstation (gNodeB) und des User Equipments (UE) direkt aus Gazebo heraus zu steuern. Externe Tester:innen können so unkompliziert verschiedene Frequenzbänder oder TDD-Pattern (Time Division Duplex) evaluieren. Selbst wenn noch keine voll-dynamischen Kanalmodelle eingesetzt werden, haben diese Parameter bereits messbare und realistische Auswirkungen auf die Latenz und Bandbreite innerhalb der Simulation.
- **Domänenübergreifende Nachnutzung der DDS-Routing-Architektur:** Eine der größten technischen Herausforderungen dieses Projekts war das komplexe IP-Routing des DDS-Traffics (Data Distribution Service), damit dieser nahtlos über das virtuelle 5G-Interface kommuniziert. Die von uns dafür entwickelte Open-Source-Lösung stellt eine extrem belastbare technologische Basis dar. Da DDS nicht nur in der Robotik (ROS 2), sondern als Standardprotokoll in zahlreichen anderen sicherheitskritischen IoT- und Automatisierungsanwendungen genutzt wird, lässt sich dieses Routing-Konzept sehr einfach auf völlig andere, nicht-robotische Software-Domänen übertragen.

Strategischer Ausblick: Unsere strategische Vision und unser erklärtes Ziel ist es, dass die bereitgestellte Architektur als technologischer Katalysator wirkt. Wir gehen davon aus, dass die offengelegte Codebasis in der Community eine Vielzahl an individuellen Entwicklungen, Adaptionen und neuen Use-Cases anstoßen wird, von denen letztlich das gesamte Open-Source-Ökosystem profitiert.