



5G-Logistik – Stationsübergreifende Nutzung autonomer Fahrsysteme in der Logistik

Schlussbericht im Rahmen des Forschungsprojekts ‚5G Industry Campus Europe‘

Einzel-Abschlussbericht 5G-ICE
des FIR e. V. an der RWTH Aachen – Arbeitspaket 5G-Logistik

Projektlaufzeit: 01.08.2019 – 31.12.2022
Förderkennzeichen: VB5GICEFIR

Projektträger



Konsortialführer



Projektpartner



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

1. Aufgabenstellung

Das Projekt 5G-Industry Campus Europe (5G-ICE) hatte zum Ziel, die Forschungsinfrastruktur auf dem Campus Melaten der RWTH Aachen aufzubauen und sie mittels vorwettbewerblicher Forschungsprojekte zur Umsetzung relevanter industrieller Anwendungen von 5G in der Produktion zu etablieren. Die dort angesiedelten Forschungsinstitute Fraunhofer IPT, Werkzeugmaschinenlabor WZL und das FIR an der RWTH Aachen haben sich zur Aufgabe gemacht, den „5G-Industry Campus Europe“ durch sukzessive Ausrüstung mit 4G- und 5G-Systemen sowohl indoor als auch outdoor zu realisieren. Darauf aufbauend waren mehrere Etablierungsprojekte geplant, in denen gezielt Gebrauch von der 5G-Infrastruktur gemacht werden sollte und die dazu dienen sollten, verschiedene Leistungsmerkmale von 5G für den Einsatz in der Produktion herauszustellen und zu validieren. Das FIR an der RWTH Aachen war im Rahmen des Projekts ‚5G-Industry Campus Europe‘ verantwortlich für Arbeitspaket 4: „Stationsübergreifende Nutzung autonomer Fahrsysteme in der Logistik (5G-Logistik)“.

Die Aufgabe des FIR im Rahmen des Projekts ‚5G-ICE‘ bestand neben dem grundlegenden Infrastrukturaufbau darin, die Möglichkeiten von 5G-Netzwerken zur Erhöhung der Skalierbarkeit und Flexibilität von Logistiksystemen zu erforschen. Insbesondere sollte untersucht werden, wie automatisierte, elektrische Fahrsysteme in die Logistiknetzwerke integriert werden können und wie u. a. die Sicherheit dieser Systeme gewährleistet werden kann. Eine Kern-Aufgabenstellung lag in der Realisierung eines 5G-Demonstrators, der die notwendige Verarbeitung von großen Datenmengen realisiert, die in vergleichbaren Anwendungsfällen von den Sensoren der autonomen Fahrzeuge generiert werden.

Konkret wurden folgende Aufgabenpunkte im Projektmanagement und der Projektkoordination im Usecase Logistik aufgenommen:

- Anforderungserhebung mit Expertengespräch, Best-Practice- und Literaturrecherche
- Erstellung von Usecase-Storylines als Grundlage der Usecase-Ausgestaltung
- Gestaltung und Umsetzung der logistischen Test-Cases sowie Identifikation erster relevanter Informationsquellen und -senken und deren Dokumentation im Rahmen eines Informationslogistikkonzepts
- Etablierung der Versuchsinfrastruktur (insb. Netzwerkeinrichtung)
- Auswahl/Anbindung AGV und Sensorik mit Ableitung eines Retrofit-Konzepts
- Ableitung und Spezifikation relevanter Network-Slices
- Konzeption und Dokumentation Referenzarchitektur für AGV in logistischen Systemen
- Identifikation und Umsetzung prototypischer Schnittstellen zu relevanten Systemen
- Durchführung und Auswertung von Expertenpanels
- Konzeption und Bau Demonstrator
- Dissemination und Dokumentation

Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Der Einrichtung der Forschungsinfrastruktur „5G Industry Campus Europe“ wurde eine nationale Bedeutung beigemessen, für deren Umsetzung es Expert:innen mit ausgewiesenen Kompetenzen in der Produktionstechnik sowie umfangreicher Produktionsausstattung bedurfte. Dies ist bei den beteiligten Instituten IPT, WZL und FIR der Fall. Das Vorhaben wurde also von Forschungsinstituten aus dem Bereich Produktionstechnik durchgeführt, welche vorwiegend drittmittelfinanziert sind. Freie Ressourcen stehen allen drei Instituten IPT, WZL und FIR nicht zur Verfügung. Für den Aufbau der 4G/5G-Infrastruktur fielen erhebliche Investitions- und Betriebskosten an. Alternative Fördermaßnahmen waren zum Stand der Einreichung nicht ausgeschrieben.

Konkret steht im Kontext des Logistik-Usecase die Logistik der Produktion vor der Herausforderung, Materialflüsse flexibel zu gestalten, um Güter in kürzester Zeit und zu geringsten Kosten an den richtigen Zielort zu bringen. Kunden- und Unternehmensanforderungen nach instantaner Verfügbarkeit individuell gefertigter Waren fordern eine noch höhere Leistungsstufe. Eine weitere Herausforderung besteht in der schnell skalierenden Anzahl zu vernetzender Systeme sowie der Möglichkeit, mobile Einheiten leistungsstark an- und in die neuen Logistiknetzwerke einzubinden. Im Sinne der weitergehenden Automatisierung werden automatisierte, elektrische Fahrsysteme stark Eingang in die externe und interne Logistik finden und die bisherige Außen-/Innenabgrenzung verschwimmen lassen. Hierfür benötigen die Fahrzeuge eine schnelle, zuverlässige und performante Datenanbindung, die von bisherigen drahtlosen Technologien nicht abgedeckt werden kann. Zudem sind die meisten produzierenden Betriebe mit WLAN-Infrastruktur im Produktivbetrieb bereits ausgelastet und können keine weiteren Geräte mehr in die Netzwerke aufnehmen. Dies trifft im Besonderen auf autonome und frei fahrende Fahrsysteme in und zwischen den Produktions- und Logistikkomplexen zu. Um diesen Zielzustand zu erreichen, ist eine systematische Evaluation des

Schlussbericht – 5G Industry Campus Europe

Anwendungsfalls sowie dessen erste Implementierung und Validierung in einer Produktionsumgebung unter Betrachtung von relevanten Prozessen, Zuständen und Bewegungen erforderlich.

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das FIR an der RWTH Aachen ist im Rahmen des „5G-Industry Campus Europe“ verantwortlich für Arbeitspaket 4: „Stationsübergreifende Nutzung autonomer Fahrsysteme in der Logistik (5G-Logistik)“. Durch eine effiziente Nutzung von 5G und dessen erweiterten Leistungsspektrum sollen der breitflächige Einsatz von AGVs in der Industrie ermöglicht und die grundlegenden notwendigen Spezifikationen und Referenzarchitekturen erarbeitet und erprobt werden. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die Einordnung im Gesamtprojekt.

Arbeitspaket (AP)	AP-Nr.	planmäßig begonnen				begonnen [PM/JJ]	beendet [PM/JJ]
		planabweichend begonnen					
		planmäßig abgeschlossen			planabweichend abgeschlossen		
Aufbau des 5G-Netzes	1					01.08.2019	31.12.2020
5G-Acoustic Emission	2					01.08.2019	31.12.2022
5G-Robotik	3					01.08.2019	31.12.2022
5G-Logistik	4	X			X*	01.08.2019	31.12.2022
5G-Production Cockpit	5					01.08.2019	31.12.2022
5G-Multisensor Plattform	6					01.08.2019	31.12.2022
5G-3D	7					01.08.2019	31.12.2022
5G-Blockchain	8					01.08.2019	31.12.2022

Die AP 3, 4 und 8 liegen schwerpunktmäßig bei den Projektpartner WZL und FIR.

*Das Projekt wurde bis zum 31.12.2022 verlängert

Unterstützung der Netzplanung und -umsetzung auf dem Cluster Smart Logistik auf dem RWTH Aachen Campus

Beim Aufbau des „5G-Industry Campus Europe“ wurde ein Indoor- und ein Outdoor-Netz am FIR realisiert. Beim Aufbau dieser Netze unterstützte das FIR die Aktivitäten von Ericsson und des Fraunhofer IPT.

Dazu wurden zunächst gemeinsam mit Ericsson, als Implementierer der Netztechnik, die bestehende Netzwerk- sowie bauliche Infrastruktur erfasst und die Platzierung und der Anschluss zentraler Netzkomponenten definiert. Anschließend wurden gemeinsam mit Ericsson und dem IPT der Aufbau des Cores, Radio-Units sowie 4G- und 5G-Dots so koordiniert, dass eine Ausleuchtung der Demonstrationsfabrik und des Outdoor-Bereichs erfolgreich umgesetzt werden konnte. Das Outdoor-Netz konnte im Jahr 2020 aufgebaut werden. Infolgedessen konnten die 5G-Außenantennen erfolgreich aufgestellt und in Betrieb genommen werden. Neben dem Aufbau der Antennen wurde dazu die notwendige Kabelführung in die Serverräume gemeinsam mit Ericsson und dem IPT umgesetzt.

Planung und Durchführung des 5G-Logistik-Anwendungsfalls

Gemeinsam mit den Konsortialpartnern wurden die geplanten Anwendungsfälle betrachtet, um Ideen auszutauschen und Synergiepotenziale zu erschließen.

Darauf aufbauend wurden Expert:innengespräche mit Anwendern und Anbietern fahrerloser Transportsysteme durchgeführt, um die praktische Relevanz des Anwendungsfalls zu garantieren. Aus den Expert:innengesprächen wurden Anforderungen an den 5G-Logistik-Anwendungsfall abgeleitet. Zudem lieferte eine Analyse aktueller Best-Practice-Beispiele industrieller fahrerloser Transportsysteme wichtige Rahmenbedingungen und Gestaltungsempfehlungen für die Auslegung des Anwendungsfalls. Die

Erkenntnisse dienen im weiteren Projektverlauf insbesondere als Grundlage für die Erarbeitung der Steuerungsarchitektur.

Der stationsübergreifende logistische Anwendungsfall wurde in mehreren Inkrementen durchgeführt, die funktional aufeinander aufbauen. In einem ersten Schritt wurde ein Mini-AGV aufgebaut, anhand dessen das Funktionsprinzip des Anwendungsfalls exemplarisch dargestellt und kontinuierlich weiterentwickelt wurde, um im Anschluss die Basis für sich ebenfalls stetig weiterentwickelnde Untersuchungen in einem größeren Format bieten zu können.

Nach der anschließenden Identifikation eines geeigneten Outdoor-AGVs konnte so die Anbindung des *Clearpath Robotics Husky-AGV* an das 5G-ICE-Indoor-Netz durchgeführt werden, sodass die Basis für die letzten Schritte erfolgreich gelegt wurde. Das AGV ist dabei mit der notwendigen Sensorik zur Erledigung der geforderten Fahraufgaben ausgestattet worden, die über ROS integriert wurde. Drei zentrale erarbeitete Ergebnisse halfen, dies zu realisieren: der Erkenntnisgewinn durch die Vorarbeiten am Mini-AGV bzgl. ROS und 5G, die technisch-ökonomische Bewertung sowie das fortlaufende Testen der Anbindung von AGVs in das 5G-Netz. Zur Bewertung und Steuerung des Anwendungsfalls wurden digitale Werkzeuge entwickelt. Diese sind im folgenden Kapitel näher dargestellt.

Projektmanagement

Die Partner des „5G-Industry Campus Europe“ trafen sich im monatlichen Rhythmus zu einem gemeinsamen Konsortialtreffen. Das FIR nahm regelmäßig an den Konsortialtreffen teil, hat vom aktuellen Arbeitspaketstatus berichtet und definierte Maßnahmen im Teilprojekt umgesetzt. Zudem trug das FIR aktiv zur inhaltlichen Gestaltung der Konsortialtreffen bei.

Hauseigene Publikationen und Newsletter wurden vom FIR genutzt, um Aktivitäten, Möglichkeiten und Zielstellungen des „5G-Industry Campus Europe“ einem breiten Publikum bekannt zu machen. Aufgrund der eingeschränkten Möglichkeiten zur Teilnahme an Präsenzformaten wie Fachkonferenzen und Messen durch die Corona-Pandemie hat man sich im Projektverlauf verstärkt auf die Nutzung neuer Digitalformate ausgerichtet. So hat das FIR beim 5G-ICE-Auftritt der Hannover Messe (Digitalformat), bei den *ICNAP Experience Days* (Hybridformat) und dem Synergieworkshop *CC5G.NRW* mitgewirkt sowie den hauseigenen 5G-Jahresrückblick veranstaltet. Während dieser Veranstaltungen und weiterer Demonstrationen (2 – 3 pro Jahr) konnten 5G-ICE-Erkenntnisse einem breiten Publikum zugänglich gemacht werden. Zuletzt wurden die im Projekt erzielten Ergebnisse und entwickelten Lösungen bei einer campusweiten Abschlussveranstaltung vorgestellt. Hierbei stellte das FIR den Logistik-Demonstrator in der Demonstrationsfabrik am Cluster Smart Logistik vor.

3. **Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Projekts**

5G ist die fünfte Generation der Mobilkommunikationstechnologie und verspricht Leistungsmerkmale wie hohe Bandbreite, geringe Latenz, hohe Geräteverbindung und geringer Energieverbrauch. Zu Beginn des Projekts wurde erwartet, dass 5G neue Anwendungsbereiche erschließen wird, insbesondere in der produzierenden Industrie, wo es für Mobilfunkanbieter neue Geschäftsmodelle eröffnet. Die 5G-ACIA¹ wurde gegründet, um die Bedürfnisse der Industrie in die Spezifikationen von 5G einzubeziehen und ein Forum für Diskussionen und Validierung zu bieten. Obwohl einige Unternehmen mit Beitritt zum Forum bereits Interesse an 5G gezeigt haben, fehlten vielen produzierenden Unternehmen, insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen, das Wissen und die finanziellen Mittel, um in die Technologie zu investieren und sie zu erproben.

Da zu Projektbeginn die Hardware zum Betrieb von 5G-Netzen noch nicht marktreif entwickelt wurde, gab es dementsprechend nur wenige prototypische Umsetzungen industrieller 5G-Anwendungen, u. a. gezeigt durch das Fraunhofer IPT zusammen mit der Fa. Ericsson Deutschland, bei dem ein 5G NR (New Radio) zum Echtzeit-Prozessmonitoring bei Fräsen sicherheitskritischer Triebwerkskomponenten eingesetzt wurde. Alle übrigen deutschlandweiten Demonstrationen wurden mit 4G-Systemen vorgenommen. Der Grund hierfür ist, dass es noch keine Chipsätze für 5G-Endgeräte (User-Equipment) gab. Mit einer Verfügbarkeit war nicht vor 2020 zu rechnen.

4. **Im Vorhaben verwendete bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte**

Die behandelte Mobilkommunikationstechnologie 5G wird durch die offene Standardisierung innerhalb der 3GPP und der 5G-PPP spezifiziert. Da sich das Projekt 5G-ICE zunächst mit dem grundlegenden Aufbau von 5G-Infrastruktur am Campus Melaten befasste, wurden auf keine derartigen Gegenstände oder Rechte aufgebaut. Für die Entwicklung des Logistik-Anwendungsfalls wurde insbesondere auf Open-Source-entwickelte bzw. weitestgehend offene Komponenten zurückgegriffen. Die während der Projektlaufzeit parallel

¹ A. Müller, „5G-ACIA,“ [Online]. Available: www.5g-acia.org. [Link zuletzt geprüft: 02.08.2023]

entwickelten 5G-Demonstratoren wurden am Cluster Smart Logistik mit den während der Demonstration ausgewiesenen Centern sowie immatrikulierten Partnern aufgebaut.

5. Verwendete Fachliteratur sowie benutzte Informations- und Dokumentationsdienste

Während der Durchführung des Vorhabens wurde keine Fachliteratur hinzugezogen, die über die Grundlagentheorie zu Anfang des Forschungsprojekts hinausgeht. Zum Aufbau und zur Konfiguration der Netzwerkinfrastruktur wurden Expert:innen konsultiert. Zur Entwicklung an und mit AGV im Logistik-Anwendungsfall hat sich das FIR insbesondere mit den Unternehmen *Clearpath Robotics Inc.* und *MYBOTSHOP uG* sowie den am Cluster Smart Logistik angesiedelten Expert:innen des *Center Connected Industry (CCI)* ausgetauscht und hat öffentlich verfügbare Datenblätter hinzugezogen.

6. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Der 5G-ICE besteht aus den Forschungsinstituten Fraunhofer IPT, WZL der RWTH Aachen und FIR an der RWTH Aachen. Während des Vorhabens wurden neben engen Abstimmungen innerhalb des Konsortiums ebenfalls angrenzende Institute und Einrichtungen des Campus Melaten konsultiert. Im Anwendungsfall Logistik des FIR wurden die Arbeiten insbesondere in Abstimmung mit dem Netzbetreiber *Ericsson*, der *Demonstrationsfabrik Aachen* sowie dem *Center Connected Industry* durchgeführt, die auch über die Projektlaufzeit hinaus Stakeholder für Betrieb und Weiterentwicklung der 5G-Infrastruktur sowie Anwendungsfälle sind.

7. Erzielte Ergebnisse sowie deren Nutzen und Verwertbarkeit

Realisierung der 5G-Infrastruktur

Das zentrale Ergebnis des Infrastruktursetups am Campus Melaten ist durch das umfangreiche 5G-Netz gegeben, dass sich über mehrere Forschungsinstitute sowohl outdoor als auch indoor erstreckt. Für das FIR am Cluster Smart Logistik ergibt sich somit ein Zugewinn an technischer Grundlage zum Aufbau komplexer Anwendungsfälle im Kontext Industrie 4.0 sowohl in der eigenen Demonstrationsfabrik Aachen am Cluster als auch mit den anderen Instituten am Campus. Die Infrastruktur bot bereits zur Projektlaufzeit Raum für Cluster-Partner, erste 5G-Prototypen zu entwickeln und in einer realitätsnahen Anwendungsumgebung zu testen.

Die aufgebaute und getestete Netzarchitektur bietet die Möglichkeit, dass AGVs und weitere Entitäten wie ein Intelligent Warehouse oder Sensorik über das 5G-Indoor-Netz miteinander kommunizieren können. Diese kommunizieren dazu mithilfe von 5G-Devices/Gateways über 5G Radio Dots (Antennen), die die Verbindung in das 5G-ICE-Netz realisieren. Beim Aufbau der Kommunikation sind 5G-spezifische Herausforderungen aufgetreten (wie das technische Routing von Endpunkten in der Netzarchitektur, dem Lastmanagement im Multi-Agenten-Netz und der Organisation der Anforderungen verschiedener Parteien im Gesamtnetz), die kontinuierlich in enger Zusammenarbeit mit *Ericsson* analysiert und überwunden werden konnten.

Realisierung des Logistik-Anwendungsfalls

Neben der campusweit errichteten Netzinfrastruktur lag der Fokus des FIR insbesondere in der Entwicklung des Logistik-Anwendungsfalls. Hierzu wurde ein Einsatzszenario entworfen, welches als Zielbild für die Entwicklung diente und grundlegende Teilaufgaben für AGV in produzierenden Gewerben umfasst (s. Abbildung 1). Die angenommenen Teilaufgaben umfassen (in wachsender Komplexität):

- Grundlegende Manövrierfähigkeit des Fahrzeugs
- Externe Steuerbarkeit über Befehle zum etwaigen Beladen des Fahrzeugs
- Pfadberechnung
- Kollisionsvermeidung statischer Hindernisse und enger Passagen
- Kollisionsvermeidung dynamischer Hindernisse bzw. Werkenden
- Kopplung externer Sensorik
- Netzwerk-Handover am Indoor-Outdoor-Übergang

Das Zielbild basiert originär auf einem einheitlichen Szenario in der Demonstrationsfabrik Aachen. Im Laufe des Projekts wurde das einheitliche Zielbild jedoch in Teilanwendungen unterteilt, da u. a. Netzwerkkonfigurationen sowie Lieferverzögerungen des Husky-AGV einen ganzheitlich lauffähigen Pfad erschwerten.

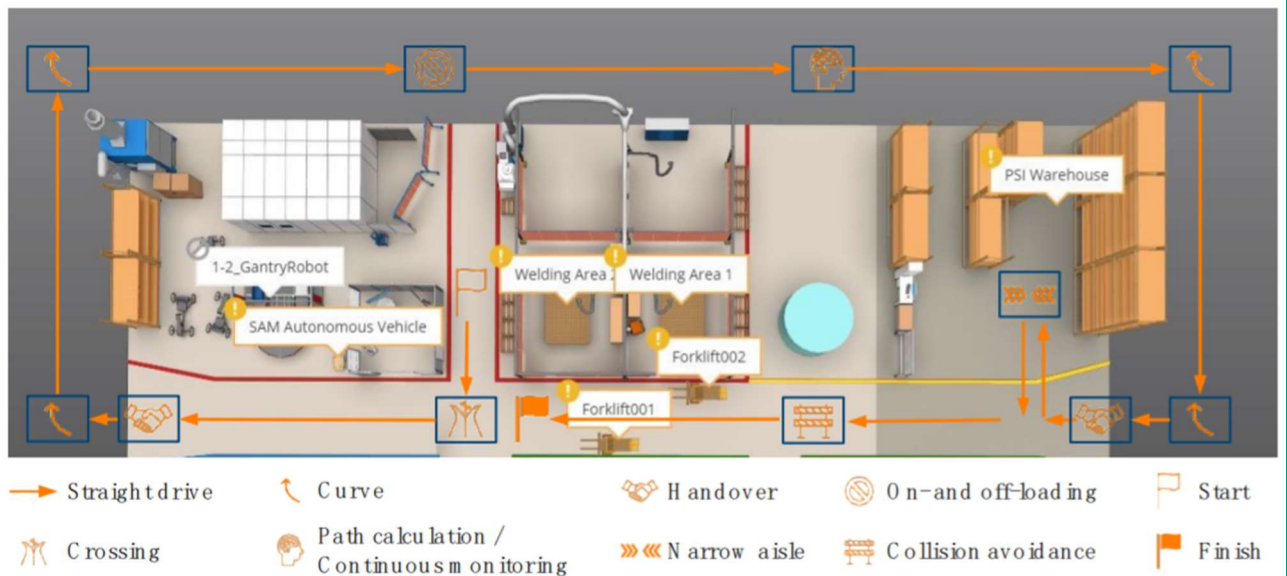


Abbildung 1: Eingangsentwurfenes Szenario in der Demonstrationsfabrik Aachen

Die grundlegenden Komponenten des Zielbildes wurden zunächst prototypisch mit einem Mini-AGV „Turtlebot3 Waffle“ entwickelt. Hierbei wurden die Grundlagen zur Vernetzung des AGV mit der 5G-Infrastruktur, die Übertragung von Sensordaten sowie die Steuerbarkeit über eine externe Anwendung gelegt. Aufbauend auf den gesammelten Erkenntnissen aus der Arbeit an dem Mini-AGV konnten signifikante Fortschritte erzielt werden. Insbesondere wurde mithilfe dessen ein passendes Outdoor-AGV identifiziert, um den 5G-Logistik-Anwendungsfall realisieren zu können. Dabei wurde das AGV von *Clearpath Robotics* „*Husky*“ im Wesentlichen aufgrund der Outdoorfähigkeit, der Leistungsfähigkeit und der Offenheit des Systems gewählt. Die anfängliche Entwicklung auf Basis des Turtlebot-AGV legte insbesondere deswegen eine Grundlage, da dieser das gleiche Rahmenwerk des Betriebssystems ROS implementierte wie das erwartete Husky-AGV.

Während die Lieferung des Husky-AGV ausstand, konnte in der Zwischenzeit ein in der Demonstrationsfabrik befindliches AGV der Firma MiR (s. Abbildung 2) auf 5G-Konnektivität umgerüstet werden, um die weiteren Komponenten des Szenarios zu implementieren. Da dieses AGV bereits mit umfassender Sensorik zur Routenberechnung, Kollisionsvermeidung und Steuerungsanwendung ausgerüstet war, wurde hiermit vorwiegend die Kopplung externer Sensorik zur dynamischen Kollisionsvermeidung mit Werkenden an Kreuzungen implementiert. Aus dem realisierten und letztlich funktionsfähigen Anwendungsfall ergaben sich insbesondere zwei Erkenntnisse: Zum einen kann die Endgeschwindigkeit des AGV mit Intelligenter Kollisionsvermeidung über externe Sensorik erheblich angehoben werden, da es nicht mehr auf die Fahrt „auf Sicht“ alleine angewiesen ist, sondern mit Sensordaten der Produktion in der Lage ist, „um Ecken zu sehen“. Somit können Fahrzeiten erheblich reduziert werden, ohne die Sicherheit für Werkende zu gefährden. Zum anderen erfordert das Sich-Verlassen auf solche sicherheitskritischen Systeme eine sehr aufwändige technische Umrüstung: Die Robustheit der 5G-Konnektivität stellt hier keine Probleme dar, sondern vielmehr die Robustheit der implementierten Logik. Um bei proprietären Systemen wie dem SAM-AGV Sicherheit zu gewährleisten, musste die externe Sensorik direkt logisch mit dem Sicherheitskreis des AGV gekoppelt werden, da keine entsprechende API zur Verfügung stand, die ein solches Szenario mit sicherheitskritischer externer Sensorik abdeckt. Dies bedeutet im Übertrag auf Anwendungen in der Industrie, dass aktuell hohe Aufwände für die Realisierung eines solchen Sicherheitskreises zu erwarten sind, sofern es sich nicht um bereits von Hersteller vorintegrierte Endpunkte handelt oder das AGV entwicklungstechnisch offen ist.



Abbildung 2: SAM-AGV, das zwischenzeitlich zur Entwicklung des Anwendungsfall diente

Mit Erhalt des Husky-AGV (s. Abbildung 3) konnten die bisherigen Arbeiten am Turtlebot-AGV übertragen werden, um das grundlegende Rahmenwerk zur Steuerung und Navigation des AGV zu finalisieren: Die Ergebnisse aus den Mini-AGV-Versuchen wurden auf das AGV übertragen, das Robot-Operating-System (ROS) wurde entsprechend konfiguriert und das AGV konnte erfolgreich über 5G angebunden und gesteuert werden. Darüber hinaus wurde ein User-Interface entwickelt (s. Abbildung 4), mithilfe dessen die notwendigen Operationen eines AGV innerhalb der Demonstrationsfabrik durchgeführt werden konnten.



Abbildung 3: Husky-AGV, das ROS implementiert und folglich freikonfigurierbar ist

Hierzu wurde ein auf dem Husky befindlicher Service entwickelt, welcher die Sensordaten des AGV konsumiert, um den Einsatzbereich zu kartografieren, entsprechende Routenfindung zu berechnen und letztlich Befehle an das AGV zu senden (s. Abbildung 4). Es resultierte eine dezentrale Steuerungsarchitektur, bei dem die Datenverarbeitung auf dem AGV vorgenommen wird. Mithilfe dieser Anwendung konnte das Husky-AGV jedoch nicht nur die externe Steuerbarkeit, Routenfindung (auch durch enge Passagen) und Kollisionsvermeidung bewerkstelligen, sondern die grundlegende Intelligenz des AGV war durch die Verortung als eigener Service modularisiert. Dies führte zur Evaluation einer zentralisierten Steuerungsarchitektur, die nachträglich in das skizzierte Anwendungsszenario überführt wurde und im folgenden Abschnitt näher erläutert wird. Vorgreifend wurde die Steuerung des AGV auf einen Server der Demonstrationsfabrik ausgelagert, sodass das Husky-AGV letztlich ein Paket aus Sensorik und Aktorik darstellte, dass über 5G-Konnektivität mit der zentralisierten Steuerung kommunizierte.

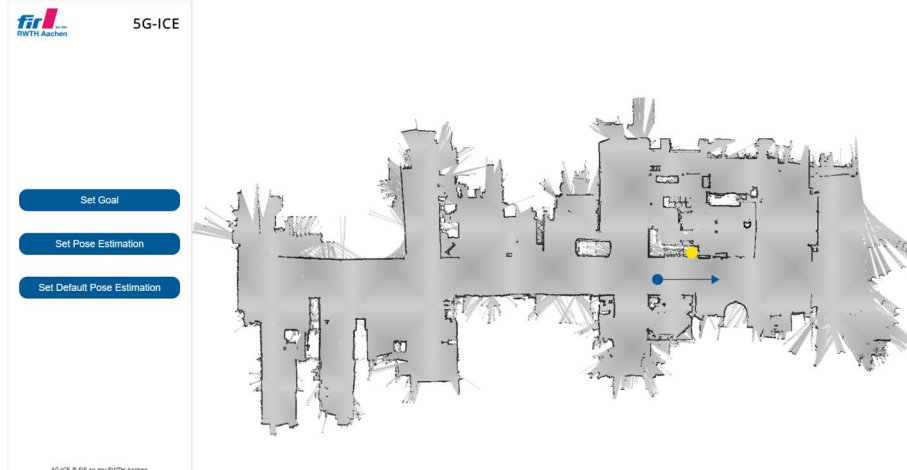


Abbildung 4: Steuerung des Husky-AGV in der Demonstrationsfabrik (dezentral und zentral)

Während die Steuerbarkeit und Reaktionsfähigkeit des AGV durch die zentralisierte Steuerung nicht kritisch beeinflusst wurden, ergaben sich neue Herausforderungen für die Realisierung des Indoor-Outdoor-Übergangs. Da das Produktionsnetz der Demonstrationsfabrik Aachen in die Netzarchitektur des Campus-5G-Netzes integriert ist, konnte ein Handover zwar erzielt werden, jedoch waren spezifische Konfigurationen am Routing notwendig. Solche Anpassungen sind im Realfall, wo eine Schnittstelle zwischen Eigen- und Fremdnetz etabliert werden muss, erwartungsgemäß nicht ohne weiteres möglich. Für den Übergangsfall wird demnach empfohlen, dedizierte Handover-Zonen zu definieren, in denen das AGV einen sicheren Übergang vollziehen kann.

Zusammenfassend konnten im Rahmen des vorab vorgestellten Infrastrukturaufbaus und des Logistik-Anwendungsfalls drei zentrale Ergebnisse und Erkenntnisse gewonnen werden, die einen wesentlichen Beitrag zur Realisierung des Demonstrators und folglich dem fortgehenden Nutzen des Demonstrators am Cluster Smart Logistik leisteten. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

Von einer dezentralen zu einer zentralen Steuerungsarchitektur:

Bei Zerlegung der AGV-Operationen innerhalb der Demonstrationsfabrik wurde deutlich, dass nicht alle Potenziale einer hochperformanten drahtlosen Kommunikationstechnologie bei solch einer dezentralen Steuerungsarchitektur erschlossen werden können. Dazu wurden einzelne Steuerungsprozesse analysiert und im Hinblick auf den Einfluss der gewählten Kommunikationstechnologie untersucht. Es zeigte sich, dass weitreichende technisch-ökonomische Potenziale erst durch die Zentralisierung der AGV-Steuerung freigeschaltet werden können (siehe dazu auch: Kiesel, R.; Henke, L.; Mann, A.; Renneberg, F.; Stich, V.; Schmitt, R.H. Techno-Economic Evaluation of 5G Technology for Automated Guided Vehicles in Production. *Electronics* 2022, 11, 192. <https://doi.org/10.3390/electronics11020192>). So können etwa erhebliche Skaleneffekte erzielt werden, wenn AGV aufgrund geringerer Anforderungen an On-Board-Intelligenz günstiger werden. Ebenso begünstigt eine zentralisierte Steuerung das Streben nach einem fabrikglobalen Optimum in der Logistik.

Aufbauend darauf wurden bereits im Jahr 2021 Vorbereitungen getroffen, um diese Zentralisierung vorzunehmen. Entsprechend wurden ROS-Pakete identifiziert, die auf die zentrale Instanz verschoben werden müssen, sowie eine geeignete Vorgehensweise zur Umsetzung dieser Verschiebung. Folglich konnte eine zentralisierte Steuerung, bei welcher die Datenverarbeitung des AGV auf einen Server im Produktionsnetz ausgelagert wird, ebenfalls implementiert und validiert werden. Das AGV verblieb folglich manövrierfähig und konnte souverän Kollisionen vermeiden, obwohl jeder Sensorwert zunächst über 5G an den zentralen Server übertragen wurde, dort ausgewertet und berechnete Steuerbefehle wieder über 5G zurück an das AGV gesandt wurden. Die Datenraten des AGV konnten durch entsprechende Konfiguration des datenintensiven LiDAR-Sensors in einer Größenordnung gehalten werden, die eine theoretische zentralisierte Steuerung einiger AGV ermöglicht. Ein Lasttest mit mehreren Endpunkten konnte allerdings aufgrund von Lieferverzögerungen von Routern nicht durchgeführt werden.

Technisch-ökonomische Bewertung der 5G-Technologie für AGVs in der Produktion

Ein zentrales Ergebnis stellt die technisch-ökonomische Bewertung der 5G-Technologie für AGVs in der Produktion dar. Es wurde eine Methodik entwickelt und auf dem Campus Melaten bereitgestellt, die sich in die Schritte *Application Specification*, *5G-Deployment Goal Selection*, *5G-Control Task Selection*, *Data Entry* und *Goal Evaluation* gliedert (s. Abbildung 5). Nachdem der Anwendungsfall definiert ist, werden technische und

ökonomische Ziele festgelegt, die einbezogen werden sollen, z. B. Flexibilität, Mobilität, Produktivität oder Sicherheit. Anschließend werden Steuerungsaufgaben innerhalb des Anwendungsfalls identifiziert, die Auswirkungen auf die gewählten Ziele haben. Mithilfe der Identifikation dieser Steuerungsaufgaben, der Ziele und der notwendigen Eingangsdaten für den 5G-Logistik-Anwendungsfall konnte die angestrebte technisch-ökonomische Bewertung durchgeführt werden. Für den in der Demonstrationsfabrik Aachen konzipierten Anwendungsfall konnte damit hergeleitet werden, dass sich die Einführung von 5G für die Steuerung von AGVs lohnt.

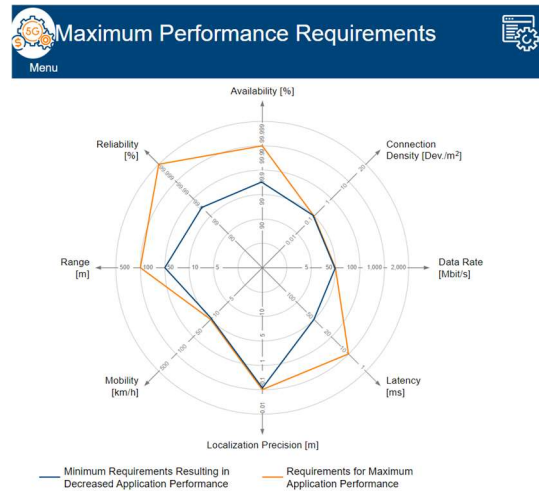


Abbildung 5: Webtool zur Evaluation des 5G-Logistik-Anwendungsfalls

5G-Devices/Gateways

Da sich die bestehenden 5G-Devices/Gateways zu Projektbeginn noch in einem prototypischen Zustand befanden, wurden beim Einsatz dieser Devices Erkenntnisse gewonnen, um die grundlegende Anbindung weiterzuentwickeln. So konnten bei diesen Arbeiten beispielsweise Herausforderungen bei der Device- und der SIM-Karten-Konfiguration aufgedeckt und gelöst werden, wie etwa die Umstellung von dynamischer auf statische IP-Vergabe oder die korrekte Registrierung von 5G-Devices im 5G-ICE-Netz. Aufgrund des prototypischen Zustands der 5G-Devices wurde sich dazu stets unter den Konsortialpartnern ausgetauscht, um von den unterschiedlichen Erfahrungen der Partner zu profitieren und das Wissen über die technischen Möglichkeiten der Devices zu erweitern. Somit wurden auch hinsichtlich der Nutzung der 5G-Devices bereits frühzeitig Erkenntnisse gewonnen, mit denen nachgelegene Herausforderungen beim Aufbau des Demonstrators begegnet werden konnten.

8. Für die Durchführung des Vorhabens relevante bekanntgewordene Fortschritte und FE-Ergebnisse von Dritten

Diverse 5G-Testbeds wurden seit Start des Vorhabens bekannt. Diese sind aber zum überwiegenden Teil in der Startphase und beziehen sich auf kleinere Testaufbauten. Veröffentlichungen zu diesen Aktivitäten gehen über Pressemitteilungen und populärwissenschaftliche Meldungen nicht hinaus.

Darüber hinaus wurde insbesondere im Rahmen der technisch-ökonomischen Bewertung und im Rahmen der Zentralisierung von AGV-Steuerungsarchitekturen auf theoretischen FE-Ergebnissen aufgebaut (wie in den Veröffentlichungsmaßnahmen kundgegeben). Die praktische Umsetzung dieser Erkenntnisse ist jedoch nach wie vor ein offenes Forschungsfeld, sodass die 5G-ICE-Ergebnisse in dieser Hinsicht einen signifikanten Beitrag zur Freischaltung von Potenzialen liefern werden.

9. Erfolge und geplante Veröffentlichungen

Während der Projektlaufzeit wurden hauseigene Publikationen und Newsletter vom FIR genutzt, um Aktivitäten, Möglichkeiten und Zielstellungen des „5G-Industry Campus Europe“ einem breiten Publikum bekannt zu machen. Aufgrund der eingeschränkten Möglichkeiten zur Teilnahme an Präsenzformaten wie Fachkonferenzen und Messen durch die COVID-Situation hat man sich im Projektverlauf verstärkt auf die Nutzung neuer Digitalformate ausgerichtet. So hat das FIR beim 5G-ICE-Auftritt der *Hannover Messe* (Digitalformat), bei den *ICNAP Experience Days* (Hybridformat) und dem Synergieworkshop *CC5G.NRW* mitgewirkt sowie den hauseigenen 5G-Jahresrückblick veranstaltet. Während dieser Veranstaltungen und weiterer Demonstrationen (2 – 3 pro Jahr) konnten 5G-ICE-Erkenntnisse einem breiten Publikum zugänglich gemacht werden. Zuletzt wurden die im Projekt erzielten Ergebnisse und entwickelten Lösungen bei einer

campusweiten Abschlussveranstaltung vorgestellt. Hierbei stellte das FIR den Logistik-Demonstrator in der Demonstrationsfabrik am Cluster Smart Logistik auf dem RWTH Aachen Campus vor.

Während außer der Veröffentlichung dieses Berichts über das Publikationsportal des FIR an der RWTH Aachen (<https://epub.fir.de/home>) und die Deutsche Nationalbibliothek sowie die Technische Informationsbibliothek Hannover keine weiteren Veröffentlichungen nach Abschluss des Projekts geplant sind, sind die Inhalte des 5G-ICE weiterhin am Campus verfügbar und erlebbar. So wurden die Komponenten und entwickelten Anwendungsfälle in das Demonstrations-Portfolio der Demonstrationsfabrik Aachen aufgenommen und werden Besucher:innen und Kund:innen am Cluster Smart Logistik als fester Bestandteil der Führungen vorgestellt.