

# Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil I 2025

## Verbundvorhaben

### DeSiRe-NG

**DEpendable and Secure Infrastructure for Resilient Next Generation Networks**

**Gefördert durch das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI)**

Konsortialführung:	Förderkennzeichen:
Christian Tismer, NUROMEDIA GmbH	<b>01MO23028</b>
Laufzeit des Vorhabens:	
von: <b>01.06.2023</b> bis: <b>31.03.2025 (nach Verlängerung)</b>	
Berichtszeitraum:	Datum:
von: <b>01.06.2023</b> bis: <b>31.03.2025</b>	<b>26.06.2025</b>

#### Projektpartner:

1. TU Ilmenau (TUILM),  
Ehrenbergstraße 29, 98693 Ilmenau,  
Prof. (Jun.-Prof.) Dr. Florian Klingler, Tel: 03677 69 11 48,florian.klingler@tu-  
ilmenau.de
2. Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe (THOWL),  
Campusallee 12, 32657 Lemgo,  
Prof. Dr.-Ing. Henning Trsek, Tel: 052617025744, henning.trsek@th-owl.de
3. NUROMEDIA GmbH (NURO),  
Schaafentr. 25, 50676 Köln,  
Tismer, Christian, Tel.: 0179 321 66 73, christian.tismer@nuromedia.com

#### unterbeauftrage Unternehmen:

1. Lufthansa Industry Solutions  
Schützenwall 1, 22844 Norderstedt  
Dr. Claudius Noack
2. InnoZent OWL e.V.  
Zukunftsmeile 2, 33102 Paderborn  
Lukas Dalhoff, Tel.: 05251 2055 916; Idalhoff@innozentowl.de

Der Konsortialbericht soll zu folgenden Punkten/Fragen kurzgefasste Angaben enthalten:

Teil I:

**Kurzbericht** (max. 2 Seiten)

Dieser soll in allgemein verständlicher Form das Vorhaben darstellen und umfasst:

1. die ursprüngliche Aufgabenstellung sowie den wissenschaftlichen und technischen Stand, an den angeknüpft wurde
2. den Ablauf des Vorhabens
3. die wesentlichen Ergebnisse sowie ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

## **1. Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand**

Das Vorhaben DeSiRe-NG zielte darauf ab, die Resilienz und Sicherheit von 5G-Campusnetzen systematisch zu untersuchen und zu verbessern. 5G ist eine Schlüsseltechnologie für industrielle Kommunikation, doch insbesondere für kritische Anwendungen bestehen weiterhin Herausforderungen hinsichtlich Netzstabilität, Störanfälligkeit und Sicherheitsmechanismen. Während 5G-Netze im Vergleich zu WLAN eine höhere Zuverlässigkeit, Qualität und Netzwerkkapazität bieten, treten auch hier Interferenzen, Überlastungen oder gezielte Störungen auf, die den reibungslosen Betrieb von Anwendungen wie automatisierte Produktion, autonome Fahrzeuge oder Echtzeit-Wartung gefährden können.

In unserem Projekt sollten damit zwei wichtige Barrieren adressiert werden, indem

(a) Störungen basierend auf Interferenz in 5G-Campusnetzen systematisch und wissenschaftlich reproduzierbar untersucht würden, sowie

(b) für Nutzer:innen von 5G-Campusnetzen eine Toolbox zur Verfügung gestellt bekämen, um auch eigene Anwendungen zum Thema Resilienz in 5G-Netzen zu erproben.

Die Planungen sahen vor, dass durch die verschiedenen – sich ergänzenden – Partner im Projekt ein interdisziplinärer Ansatz verfolgt würde, der technologische Innovation mit praxisnaher Anwendung verbinden sollte. Während die wissenschaftlichen Partner TH OWL und TU Ilmenau Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Messung und Analyse von 5G-Campusnetzen leisten sollten, sollte die Industrie, vertreten durch Lufthansa Industry Solutions und NUROMEDIA GmbH, Use Cases und Anforderungen, sowie Erfahrung aus Anwendungsszenarien mit einbringen. InnoZent OWL e.V. würde die Projektarbeit, den Transfer und die Vernetzung mit weiteren Interessensgruppen vorantreiben. Diese enge Zusammenarbeit sollte die Entwicklung eines umfassenden Test- und Evaluierungsframeworks, das sowohl wissenschaftlichen Standards als auch den industriellen Anforderungen an robuste 5G-Campusnetze gerecht wird, ermöglichen.

### **Wissenschaftlicher und technischer Stand**

5G stellt einen typischen Anwendungsfall für die Konvergenz drahtloser Kommunikation und computergestützter Netzwerktechnologien dar. Der technologische Fortschritt ermöglicht durch Software-Defined Networking (SDN), Network Function Virtualization (NFV) und Network Slicing eine flexible Netzwerknutzung, bringt aber gleichzeitig neue Sicherheitsrisiken und Herausforderungen in der Netzplanung mit sich.

Eine zentrale Herausforderung ist die Resilienz industrieller 5G-Netze gegenüber räumlichen und spektralen Störquellen. Forschungsarbeiten zeigen, dass insbesondere der Physical Layer (die eigentliche Funkübertragungsebene) anfällig für gezielte Störungen ist, beispielsweise durch Jamming-Angriffe oder unbeabsichtigte Interferenzen in hochfrequent genutzten Industriebereichen. Bestehende Ansätze konzentrieren sich meist auf

höhere Netzwerkebenen, während eine systematische Bewertung und Abwehr physikalischer Störungen bislang nicht ausreichend erforscht wurde.

### **3. Ablauf des Vorhabens**

Das Projekt verlief insgesamt gemäß den vorab aufgestellten Planungen. Nach den erfolgreich abgeschlossenen Arbeitspaketen 1 und 2 ergaben sich jedoch im Arbeitspaket 3 Verzögerungen. Diese entstanden durch verzögerte Beschaffung von Hardware aufgrund von Lieferschwierigkeiten sowie durch Personalwechsel bei verschiedenen Partnern. Nach erfolgter Projektverlängerung konnten diese Umstände deutlich abgemildert werden, sodass die gesteckten Ziele erreicht und die geplanten Lösungen vollumfänglich umgesetzt werden konnten.

### **4. Wesentliche Erkenntnis**

Das Projekt erzielte besondere Fortschritte hinsichtlich der Verbesserung von Sicherheit und Resilienz von 5G-Campusnetzen. Durch die Entwicklung eines skalierbaren Mess- und Analyseframeworks können relevante Faktoren für die Netzstabilität und Störanfälligkeit industrieller 5G-Anwendungen identifiziert und gezielt untersucht werden.

Ein zentrales Ergebnis ist die erfolgreiche Implementierung und Erprobung einer Toolbox, die es ermöglicht, die Charakteristiken eines realen 5G-Netzwerks in verschiedenen Szenarien zu messen, zu analysieren und gezielt nachzubilden. Dadurch können Netzwerkausfälle und Störungen reproduzierbar untersucht und entsprechende Gegenmaßnahmen entwickelt werden.

Besonders die Kombination aus mobilen Messsystemen, digitalen Zwillingen und softwarebasierten Störquellen setzt dabei neue Maßstäbe, indem die Performance von 5G-Netzwerken standort- und zeitabhängig analysiert werden können.

Ein zentraler innovativer Aspekt des Projekts ist die Entwicklung eines digitalen Zwillings für 5G-Netzwerke. Dieser ermöglicht es, Netzwerkszenarien unter realistischen Bedingungen zu simulieren, Störungen gezielt zu emulieren und adaptive Resilienzmechanismen zu testen. Zudem werden mit einem mobilen Messsystem Standort- und Zeitabhängigkeiten der Netzperformance erfasst, um Netzplanungen und Störfallmanagement zu verbessern. Dadurch können Einflüsse von Interferenzen, Netzwerklast und infrastrukturellen Gegebenheiten präzise erfasst werden. Diese Erkenntnisse bilden die Grundlage für zukünftige adaptive Netzwerklösungen, die sich flexibel an veränderte Betriebsbedingungen anpassen.

Hiermit erfüllt das Projekt die strategischen Ziele des Fördergebers, insbesondere die Stärkung der digitalen Souveränität und der IT-Sicherheit in der industriellen Kommunikation. Die im Projekt entwickelten Methoden tragen dazu bei, Risiken im Einsatz moderner 5G-Technologien zu minimieren und zeigen weiterhin die Notwendigkeit der Forschung hin zur effektiven Planung und Absicherung drahtloser Netzwerke auf.

# Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil II 2025

## Verbundvorhaben

### DeSiRe-NG

**DEpendable and Secure Infrastructure for Resilient Next Generation Networks**

**Gefördert durch das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI)**

Konsortialführung: Christian Tismer, NUROMEDIA GmbH	Förderkennzeichen: <b>01MO23028</b>
Laufzeit des Vorhabens: von: <b>01.06.2023</b> bis: <b>31.03.2025 (nach Verlängerung)</b>	
Berichtszeitraum: von: <b>01.06.2023</b> bis: <b>31.03.2025</b>	Datum: <b>26.06.2025</b>

#### Projektpartner:

1. TU Ilmenau (TUILM),  
Ehrenbergstraße 29, 98693 Ilmenau,  
Prof. (Jun.-Prof.) Dr. Florian Klingler
2. Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe (THOWL),  
Campusallee 12, 32657 Lemgo,  
Prof. Dr.-Ing. Henning Trsek
3. NUROMEDIA GmbH (NURO),  
Schaafenstr. 25, 50676 Köln,  
Tismer, Christian

#### unterbeauftragte Unternehmen:

1. Lufthansa Industry Solutions  
Schützenwall 1, 22844 Norderstedt  
Dr. Claudius Noack
2. InnoZent OWL e.V.  
Zukunftsmeile 2, 33102 Paderborn  
Lukas Dalhoff

## Teil II:

1. Aufgabenstellung (ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten, insbesondere im Vergleich zu ursprünglichen Vorhabensbeschreibung. Bei Einzelvorhaben soll möglichst ein Umfang von 20 Seiten nicht überschritten werden. Die Verwendung der Zuwendung sowie die erzielten Ergebnisse im Einzelnen müssen nachvollziehbar sein.)
2. die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit
4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit
5. Fortschritt bei anderen Stellen
6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

# Inhalt

<b>1. Aufgabenstellung</b> .....	<b>4</b>
1.1 Hintergrund und Motivation .....	4
1.2 Projektziele gemäß Vorhabensbeschreibung .....	4
1.3 Durchgeführte Arbeiten (SOLL-IST-Vergleich) .....	5
1.4 Technologische Innovationen .....	7
<b>2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises</b> .....	<b>8</b>
<b>3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit</b> .....	<b>9</b>
3.1 Inhaltliche Notwendigkeit der Arbeitspakete .....	9
3.2 Anpassungen im Projektverlauf .....	9
3.3 Angemessenheit des Umfangs .....	9
<b>4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit</b> .....	<b>10</b>
4.1 Industrielle Anwendbarkeit .....	10
4.2 Transfer in KMU und öffentliche Infrastruktur .....	10
4.3 Verwertungsstrategien der Projektpartner .....	10
4.4 Nachhaltigkeit und Anschlussfähigkeit .....	11
<b>5. Fortschritt bei anderen Stellen</b> .....	<b>11</b>
<b>6. Erfolge und geplante Veröffentlichungen</b> .....	<b>12</b>
6.1 Bereits erfolgte Veröffentlichungen .....	12
6.2 Geplante Veröffentlichungen .....	12

# 1. Aufgabenstellung

## 1.1 Hintergrund und Motivation

Ziel des Projekts DeSiRe-NG – DEpendable and Secure Infrastructure for Resilient Next Generation Networks war es, die Resilienz und Sicherheit von 5G-Campusnetzen in industriellen Einsatzumgebungen systematisch zu untersuchen, zu bewerten und technologisch zu verbessern. 5G wird als Schlüsseltechnologie für zukünftige Industriekommunikation bewertet, jedoch bestehen in der Praxis weiterhin erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich:

- der Zuverlässigkeit und Performance im Produktivbetrieb,
- der Störanfälligkeit bei Interferenz bzw. Angriffen, sowie
- der technischen Nachvollziehbarkeit von Netzverhalten und -reaktionen.

Vor diesem Hintergrund zielte DeSiRe-NG auf die Entwicklung eines interdisziplinären Werkzeugkastens ab, der Unternehmen befähigt, Störungen und QoS-Einbrüche in Campusnetzen zu identifizieren, zu analysieren, zu emulieren. Mittels des digitalen Zwillings wird der QoS-Zustand des Campusnetzes gespiegelt und dadurch kann mit ebendiesem interagiert werden. Es können ebenso Messungen zur Aktualisierung der QoS-Daten anfordert werden und eine Reproduktion von Szenarien über die Impairment Entity als Akteur des digitalen Zwillings vorgenommen werden.

Zentraler Anwendungsfall in diesem Projektvorhaben war die von der Lufthansa Industry Solutions eingebrachte Virtual Table Inspection (VTI). Dabei handelt es sich um die remote-geführte visuelle Inspektion von Triebwerkskomponenten via hochauflösenden Videostreams in Echtzeit – mit hohen Anforderungen an Datenrate, Latenz und Stabilität.

## 1.2 Projektziele gemäß Vorhabensbeschreibung

In der Vorhabensbeschreibung wurde das Gesamtvorhaben in folgende inhaltliche und technische Zielstellungen gegliedert:

Arbeitspaket (AP)	Kernzielsetzung
AP1 – Anforderungs- & Bedrohungsanalyse	Identifikation von Performance-Metriken und Störszenarien, Ableitung von Anforderungen für resiliente Netze
AP2 – Messframework	Konzeption und Implementierung eines verteilten, skalierbaren QoS-Messsystems mit zentralem Orchestrator
AP3 – Mobiles Messsystem	Entwicklung eines AGV-gestützten Systems zur raumzeitlichen Datenerhebung mit Integration in Digital Twin
AP4 – Toolbox zur Performance-Modellierung	Entwicklung eines Emulators zur Nachbildung realer Netzbedingungen und Auswertung der Resilienz
AP5 – Evaluation & Integration	Zusammenführung der Komponenten, Test und Demonstration unter praxisnahen Bedingungen
AP6 – Transfer & Projektmanagement	Dissemination, Projektkoordination, Einbindung industrieller Zielgruppen durch InnoZent OWL

Nachfolgend wird dazu ein rückblickender Soll-Ist-Vergleich vorgenommen.

### 1.3 Durchgeführte Arbeiten (SOLL-IST-Vergleich)

Das Projekt DeSiRe-NG verfolgte einen modularen und anwendungsnahen Aufbau entlang von sechs Arbeitspaketen (AP1–AP6), die durch vier Meilensteine validiert und strukturiert wurden.

Die Durchführung der Arbeiten erfolgte im Wesentlichen im Einklang mit der ursprünglichen Planung, erforderte jedoch im Projektverlauf eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung um vier Monate, um Verzögerungen bei Beschaffung und Integration sowie Infrastrukturprobleme auszugleichen.

Die Umsetzung der geplanten Arbeiten verlief insgesamt sehr erfolgreich und es wurden alle adressierten Lösungen erreicht.

#### (Angepasste Zeitplanung)

Arbeitspaket (AP)	AP Leitung	Beteiligte	Projekt Monate																				
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Meilensteine					MS1						MS2						MS3		MS3			MS4	
Kalendermonat ' Jahr			06'23	07'23	08'23	09'23	10'23	11'23	12'23	01'24	02'24	03'24	04'24	05'24	06'24	07'24	08'24	09'24	10'24	11'24	12'24	01'25	02'25
Anforderungs- und Bedrohungs-analyse	TH OWL	NUROMEDIA TH OWL TU Ilmenau 2x Unterauftragnehmer																					
Konzipierung eines Messframeworks zur Quantifizierung von relevanten Parametern eines 5G Netzwerks	TU Ilmenau	NUROMEDIA TH OWL TU Ilmenau 1x Unterauftragnehmer																					
Entwicklung eines mobilen Messsystem für relevante Parameter eines 5G Campusnetzes	NUROMEDIA	NUROMEDIA TH OWL TU Ilmenau 1x Unterauftragnehmer																					
Entwicklung einer Toolbox zur Modellierung der Performance	TU Ilmenau	NUROMEDIA TH OWL TU Ilmenau																					
Evaluation der entworfenen Mechanismen und Frameworks	TH OWL	NUROMEDIA TH OWL TU Ilmenau 2x Unterauftragnehmer																					
Transfer und Projektmanagement	1x Unterauftragnehmer	NUROMEDIA TH OWL TU Ilmenau 2x Unterauftragnehmer																					

#### Kurzüberblick über den Status:

AP1	Use Case-Analyse & Bedrohungsszenarien vollständig abgeschlossen – mit dokumentierter Metrik-Matrix für VTI-Use Case
AP2	Framework-Design & Interferenzttests erfolgreich abgeschlossen; inkl. jamming-Workshops und Interface-Spezifikation
AP3	Integration AGV, Digital Twin & Mobile App erfolgreich abgeschlossen
AP4	Toolbox-Entwicklung erfolgreich abgeschlossen; Komponenten implementiert, Integration mit orchestrierter Oberfläche erfolgreich abgeschlossen
AP5	Evaluation & Demonstratoraufbau umgesetzt; Fokus auf VTI-Anwendung, SDR-basierte Interferenzszenarien, Dashboard-Integration
AP6	Dissemination & Vernetzung, sowie Projektmanagement kontinuierlich erfolgt. Öffentlichkeitsarbeit auf 5G/6G-Foren, Konferenzen und Messen, sowie durch Veröffentlichungen, realisiert.

## Arbeitspakete im Überblick (SOLL-IST)

- AP1: Anforderungs- und Bedrohungsanalyse**  
 Dieses Arbeitspaket wurde vollständig und termingerecht abgeschlossen. Unter Leitung der TH OWL wurden relevante 5G-Anwendungsfälle, insbesondere der Use Case „Virtual Table Inspection“ der Lufthansa Industry Solutions, detailliert analysiert. Es erfolgte eine umfassende Bedrohungsmodellierung (z. B. Jamming, Interferenzen, Systemfehler), die in eine strukturierte Metrik-Matrix überführt wurde. Diese bildet die Grundlage, unter anderem für die spätere Emulation.
- AP2: Entwicklung eines Messframeworks**  
 Die Konzeption und prototypische Umsetzung des QoS-Messsystems wurde im geplanten Zeitrahmen realisiert. Unter Leitung der TU Ilmenau entstand ein verteiltes System mit zentralem Orchestrator, mobilen Measurement Clients und persistenter Middleware zur Datenhaltung und Visualisierung.
- AP3: Mobiles Messsystem & Digital Twin**  
 Dieses Arbeitspaket wurde durch Lieferverzögerungen (AGV bei Nuromedia), Personalfuktuation sowie Instabilitäten der 5G-Infrastruktur beeinflusst. Durch intensive Abstimmungen im Konsortium sowie durch Bereitstellung eines TH OWL-eigenen AGV konnte eine funktionsfähige mobile Messplattform aufgebaut werden. Parallel erfolgte die Entwicklung des Digitalen Zwillings.
- AP4: Toolbox zur Netzwerkemulation**  
 Aufbauend auf den in AP3 erzeugten QoS-Daten wurde eine Emulationskomponente entwickelt, mit der Netzcharakteristiken reproduzierbar auf Ethernet-Verbindungen nachgebildet werden können. Die Interpolation von Messwerten über eine zentrale Middleware und die grafische Steuerung über ein Interface wurden integriert.
- AP5: Evaluation & Demonstration**  
 Im AP5 wurden alle Komponenten in zwei (Test-)Umgebungen (SmartFactoryOWL und Lufthansa Basis Hamburg) zusammengeführt und unter realen Bedingungen getestet. Hierzu wurde ein eigener Video-Streaming-Testcase entwickelt, der die Funktionalität der VTI simuliert. Durch Kombination mit Jamming-Szenarien und Heatmap-Analysen wird die Resilienz des Netzes ganzheitlich überprüft.
- AP6: Transfer & Projektkoordination**  
 Durch das gesamte Konsortium wurden zahlreiche Transfermaßnahmen durchgeführt, darunter Fachveranstaltungen, Konferenzbeiträge und zielgruppengerechte Disseminationsformate. Das Projektmanagement ermöglichte eine engmaschige Abstimmung und koordinierte die erfolgreiche Umsetzung der Arbeitspakete.

Die inhaltliche Umsetzung des Projekts orientierte sich an vier Meilensteinen, die den Fortschritt entlang zentraler Arbeitspakete abbildeten:

Meilenstein	Zielstellung	Plan	Erreichung
<b>M1</b>	Use Case, Metriken & Bedrohungsanalyse (AP1)	09/2023	planmäßig erreicht
<b>M2</b>	Implementierung Messframework & Digital Twin (AP2, AP3)	03/2024	planmäßig erreicht
<b>M3</b>	Integration von AGV, Emulation, Mobile App (AP3, AP4)	08/2024	mit Projektverlängerung abgeschlossen
<b>M4</b>	Demonstration & Evaluation (AP5)	10/2024	mit Projektverlängerung abgeschlossen

Der Projektverlauf zeigt hier deutlich, wie im Rahmen eines kooperativen Konsortialprojekts auch technische Herausforderungen und operative Verzögerungen transparent identifiziert,

kommuniziert und durch gezielte Kompensationsmaßnahmen (z. B. alternative AGV-Nutzung, Middleware-Flexibilisierung, agile Integration) ausgeglichen werden konnten. Dadurch wurden die Projektziele vollumfänglich erreicht.

#### **1.4 Technologische Innovationen**

Das Projekt DeSiRe-NG hat in mehreren zentralen technologischen Bereichen bedeutende Innovationsleistungen erbracht, die über den Stand der Technik hinausgehen. Im Mittelpunkt steht ein ganzheitliches System zur Analyse und Sicherstellung der Netzwerkresilienz in 5G-Campusnetzen – mit Relevanz für industrielle Anwendungen wie den Lufthansa-Use Case der Virtual Table Inspection (VTI).

Ein wesentliches Ergebnis ist die Entwicklung eines skalierbaren, modularen QoS-Messsystems, das sich aus drei Kernkomponenten zusammensetzt: dem Measurement Client, dem Measurement Endpoint und dem Measurement Orchestrator. Dieses System ermöglicht es, 5G-Netze unter realen Bedingungen hinsichtlich Latenz, Datenrate und Stabilität zu beurteilen. Die Besonderheit liegt dabei in der räumlich-zeitlichen Zuordnung der Messdaten, wodurch Heatmaps der Netzqualität in industriellen Umgebungen erzeugt werden konnten.

Zur mobilen Datenerfassung wurde ein autonomes AGV (Autonomes Bodenfahrzeug) integriert, das mit der Messinfrastruktur vernetzt ist. Die Steuerung erfolgt entweder manuell oder über definierte Zielkoordinaten. In Verbindung mit einer eigens entwickelten "Mobile App" kann ein Techniker innerhalb eines Produktionsbereichs gezielt Standorte anfahren lassen, an denen QoS-Probleme identifiziert wurden. Diese Daten werden zentral im Backend aggregiert und visualisiert.

Die Mobile App erfüllt zudem die Aufgabe eines Warnsystems. Werden zuvor festgelegte Mindestanforderungen für QoS-Parameter während einer VTI unterschritten, warnt die Mobile App den ausführenden Techniker und bietet die Option an, das AGV zu einer weiterführenden Messung anzufordern.

Als technische Lösung aus diesem Vorhaben kann die Implementierung eines Digitalen Zwillings für 5G-Netze gelten, der die Struktur sowie die zeitlich und räumlich aufgelösten Performanceparameter des realen Netzwerks in digitaler Form abbildet. Die Lösung basiert auf der Asset Administration Shell (AAS) und erfasst unter anderem die Verbindungseigenschaften (z. B. übertragene Pakete, Latenz) sowie Statusinformationen zu Basisstationen und User Equipment. Damit wurde ein entscheidender Schritt in Richtung einer intelligenten, adaptiven Netzbewertung und -steuerung im industriellen Kontext gemacht.

Ergänzt wird das System durch ein sogenanntes Impairment-System, das es erlaubt, reale QoS-Zustände des Netzes wiederzugeben – etwa um Anwendungen wie Videostreaming (VTI) unter beeinträchtigten Netzwerkbedingungen zu testen. Die Parametrierung erfolgt auf Basis gemessener Werte oder interpolierter Daten. Damit ist die gezielte Emulation von Störungen im 5G-Netz möglich.

Insgesamt ergibt sich ein umfassender technischer Stack: von der Messdatenerhebung über den Digitalen Zwilling bis zur reproduzierbaren Emulation. Die Interoperabilität zwischen den Komponenten wurde im Rahmen mehrerer Integrationstreffen sichergestellt und erfolgreich getestet. Diese Systemarchitektur bietet eine hohe Übertragbarkeit auf andere industrielle Szenarien, inklusive WLAN und 6G.

## 2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis erfolgte auf Basis der genehmigten Mittel und der projektinternen Verteilung gemäß der Zuwendungsbescheide.

Die damit verbundenen Gesamtausgaben des Projekts wurden innerhalb des vorgesehenen Budgetrahmens verwendet.

Das Projekt DeSiRe-NG wurde insgesamt wirtschaftlich und zweckmäßig durchgeführt. Alle aufgewendeten Mittel standen in einem direkten und überprüfbaren Zusammenhang mit den definierten Projektzielen und wurden konsequent zur Erreichung dieser Ziele eingesetzt. Im gesamten Projektverlauf kam es zu keiner Budgetüberschreitung. Sämtliche Kostenpositionen – insbesondere im Bereich Personal, Sachausgaben und projektbezogene Infrastruktur – können klar den inhaltlichen Arbeitspaketen zugeordnet werden und haben jeweils einen nachvollziehbaren und messbaren Beitrag zum Projekterfolg geleistet. Die im Sommer 2024 beantragte und bewilligte kostenneutrale Projektverlängerung diente ausschließlich der Sicherung der Ergebnisqualität in Folge unvorhersehbarer externer Einflüsse und konnte ohne zusätzlichen Mittelbedarf innerhalb des bestehenden Finanzrahmens umgesetzt werden.

Die Hauptausgaben des Projekts entfielen – wie bei forschungsintensiven Vorhaben üblich – auf Personalkosten. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Finanzierung von wissenschaftlichen Mitarbeitenden, die für die Konzeption, Entwicklung und Implementierung der Systemarchitektur (Messsystem, Digital Twin, Impairment-System) unerlässlich waren.

Ergänzend dazu wurden Investitionen im Bereich Infrastruktur, insbesondere zur Ausstattung mit 5G-spezifischen Komponenten und Applikationen vorgenommen. Hierzu zählen unter anderem die Anschaffung von 5G-Modems, Daughterboards für Software-Defined Radios (SDRs), Synchronisationseinrichtungen (GPSDOs, OctoClock), mobilen Rechnern und mobiler Hardware für den Aufbau des autonomen Messsystems (z. B. AGV-Komponenten, Hochleistungsrouter). Diese Ausstattung bildete nicht nur die technische Grundlage für die im Projekt verfolgte Forschung und Entwicklung, sondern wird auch über das Projektende hinaus für weiterführende wissenschaftliche Arbeiten in den Bereichen 5G-Resilienz, Netzwerkmanagement und Industriekommunikation genutzt.

Durch die ausgewogene Verteilung der Mittel auf Personal und Infrastruktur konnte ein hoher Innovationsgrad erreicht werden, ohne den Rahmen der genehmigten Projektmittel zu überschreiten.

Die Verlängerung um vier Monate führte zu keiner Erhöhung der beantragten Mittel. Vielmehr wurde das Budget innerhalb des bewilligten Gesamtvolumens weitergenutzt, um Verzögerungen auszugleichen.

### 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Rahmen des Projekts DeSiRe-NG durchgeführten Arbeiten waren sowohl inhaltlich erforderlich als auch angemessen, um die angestrebten Ziele – die Entwicklung eines resilienten, analysierbaren und übertragbaren 5G-Infrastruktur-Stacks – zu erreichen. Die wissenschaftlich-technische Tiefe, der modulare Aufbau sowie die Interdisziplinarität des Projekts bedingten dabei die vorgesehene stringente Arbeitsteilung zwischen den beteiligten Partnern.

#### 3.1 Inhaltliche Notwendigkeit der Arbeitspakete

Die Umsetzung der sechs Arbeitspakete folgte einer logisch aufeinander aufbauenden Struktur:

- **AP1 und AP2** schufen mit der Anforderungs- und Bedrohungsanalyse sowie der Konzeption des Messframeworks die methodische und infrastrukturelle Grundlage für alle Folgearbeiten.
- **AP3 und AP4** waren erforderlich, um ein reales, messfähiges 5G-Netz (inkl. AGV und Digitalem Zwilling) zu etablieren und daraus abgeleitet eine Toolbox zur reproduzierbaren Netzwerkanalyse zu entwickeln.
- **AP5** stellte die Verifikation der technischen Komponenten unter praxisnahen Bedingungen sicher.
- **AP6** sorgte für die projektübergreifende Koordination, Dissemination und den Transfer in Anwendungsfelder.

Die Ergebnisse – wie z. B. das vollständig aufgebaute Messsystem, die QoS-Heatmaps, die Inter-/Extrapolationsmechanismen und das Emulationssystem zeigen, dass jedes Arbeitspaket substantiell zum Projekterfolg beigetragen hat.

#### 3.2 Anpassungen im Projektverlauf

Die erbrachten Leistungen mussten im Verlauf des Projekts an veränderte Rahmenbedingungen angepasst werden. Dazu zählen:

- Verzögerungen in der Beschaffung von AGV-Hardware (Nuromedia),
- defekte 5G-Basisstation (alle Partner),
- Personalwechsel bei mehreren Partnern,
- notwendige Umbauten der Middleware zur Interoperabilität zwischen den Komponenten.

Diese Einflüsse wurden innerhalb des Konsortiums transparent adressiert, die Aufgaben entsprechend anders priorisiert, und die notwendige Projektverlängerung wurde beantragt, ohne den Mittelrahmen zu überschreiten.

#### 3.3 Angemessenheit des Umfangs

Der Umfang der geleisteten Arbeiten entsprach dem geplanten Ressourceneinsatz und war gemessen an der Zielsetzung vollständig gerechtfertigt. Dies zeigt sich nicht zuletzt daran, dass:

- zentrale Innovationen wie der Digitale Zwilling, das Impairment-System und die Visualisierungen bis zur Anwendbarkeit geführt wurden,
- ein funktionierender Demonstrator mit praxisrelevanten Testszenarien (VTI, Jamming, Streaming etc.) realisiert wurde,
- eine hohe interne wie externe Sichtbarkeit über Konferenzen, Workshops und Publikationen erzielt werden konnte.

Auch die Verzahnung von akademischer Forschung, industrieller Praxis und Transfermechanismen war hinsichtlich Tiefe und Breite angemessen. Der konkrete technologische, organisatorische und strategische Nutzen wurde im Sinne des Fördergebers auf mehreren Ebenen erreicht.

## 4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Die im Projekt DeSiRe-NG entwickelten Konzepte, Systeme und Werkzeuge bieten ein weites Potenzial für technologische und wirtschaftliche Verwertung. Insbesondere für Betreiber industrieller 5G-Campusnetze stellt das Projektergebnis ein praxisnahes Instrumentarium zur Verfügung, um Netzqualität und Resilienz strukturiert zu bewerten, gezielt zu verbessern und bei Bedarf anwendungsspezifisch zu optimieren.

Die erarbeiteten Ergebnisse stellen sich auf nachfolgenden Ebenen dar:

### 4.1 Industrielle Anwendbarkeit

Ein zentrales Anwendungsfeld ist die sichere und störungsarme Kommunikation im industriellen Produktionsumfeld, wie sie beispielsweise im Use Case „Virtual Table Inspection“ (VTI) der Lufthansa Industry Solutions exemplarisch betrachtet wurde. Hier wird deutlich:

- Störungen im Netzbetrieb (z. B. Interferenzen, Jamming, Überlastung) können künftig über die im Projekt entwickelte Toolbox nachvollziehbar simuliert und bereits im Vorfeld adressiert werden.
- Unternehmen erhalten mit dem Digitalen Zwilling ein Planungs- und Betriebswerkzeug zur Echtzeitbewertung von Netzqualität und Verbindungsstabilität – auch über heterogene Netzstrukturen hinweg.
- Die Kombination aus AGV-Messrobotik, adaptiver Middleware und Heatmap-Visualisierung erlaubt die Standortanalyse innerhalb komplexer Fertigungsstätten.

Diese Projektergebnisse sind dabei nicht auf ein 5G-Netz oder einen bestimmten Hersteller beschränkt, sondern modular übertragbar auf andere Funktechnologien (z. B. WLAN, zukünftige 6G-Standards).

### 4.2 Transfer in KMU und öffentliche Infrastruktur

Durch die kontinuierliche Einbindung von InnoZent OWL als Transferpartner sowie durch Präsentationen auf einschlägigen Veranstaltungen (u. a. 5G/6G-Foren, DIGITALEZUKUNFT@OWL und im 5G Kompetenznetzwerk NRW) wurde sichergestellt, dass die Projektergebnisse gezielt in das KMU-Umfeld, jedoch auch Hochschulen und andere Transfereinrichtungen überführt werden konnten. Dazu wurden verschiedene Gespräche und Workshops initiiert und die Ergebnisse langfristig auf der Website von InnoZent OWL bereitgestellt.

Geplante Folgeaktivitäten sind:

- Integration der Systeme in Labor- und Showroom-Umgebungen (z. B. SmartFactory-OWL),
- Verwertung im Hochschulkontext (über Projekt- und Abschlussarbeiten) bei der TH OWL und der TU Ilmenau

### 4.3 Verwertungsstrategien der Projektpartner

Die einzelnen Partner verfolgen spezifische, aber komplementäre Verwertungsschwerpunkte: Nuromedia GmbH plant, die entwickelte Infrastruktur in das eigene Dienstleistungsportfolio zu überführen. Dies betrifft insbesondere Angebote im Bereich 5G-Resilienzberatung, Remote Operating, KI-basierte QoS-Diagnose und Mensch-Maschine-Kommunikation.

Die TH OWL nutzt die Ergebnisse zur Integration in bestehende Forschungsprojekte sowie zur generischen Weiterentwicklung für 6G und hybride Netze (z. B. durch Channel Emulation, Smart Deployment, Koexistenz von Campusnetzen).

Die TU Ilmenau entwickelt das Emulations- und Impairment-System weiter und stellt es als generisches Werkzeug für Kommunikationssysteme bereit. Das Ziel ist die Erweiterung anwendungsunabhängiger Test- und Simulationsumgebungen, u. a. im Rahmen internationaler Kooperationen.

InnoZent OWL e.V. übernimmt weiterhin die regionale und überregionale Verwertung als Transfernetzwerk, etwa durch Workshops, Unternehmensansprache und Einbindung in öffentliche Veranstaltungen.

#### **4.4 Nachhaltigkeit und Anschlussfähigkeit**

Die im Projekt entwickelten Technologien, insbesondere die Digitalen Zwillinge, Messsysteme und Emulationsmechanismen, sind modular aufgebaut, quelloffen dokumentiert und technologisch skalierbar. Damit ist eine einfache Übertragbarkeit auf neue Forschungsvorhaben, Pilotprojekte oder industrielle Validierungen gegeben.

Seitens Anschlussfähigkeit an diese Forschung bestehen derzeit Kooperationsabsichten für mehrere Folgeprojekte. Dazu wurden mehrere Drittmittelanträge initiiert. Ergänzend dazu sind weitere wissenschaftliche Publikationen geplant, um den langfristigen Wissenstransfer und die nachhaltige Nutzbarkeit der entwickelten Lösungen sicherzustellen.

### **5. Fortschritt bei anderen Stellen**

Das Projekt DeSiRe-NG war Teil der vom Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) initiierten Fördermaßnahme zur „Cybersicherheit und digitalen Souveränität in den Kommunikationstechnologien 5G/6G“.

Ziel dieser Förderlinie war es, durch gezielte Forschungsvorhaben die technische Autonomie Deutschlands im Bereich kritischer digitaler Infrastrukturen zu stärken. Dabei ging es insbesondere um resiliente Netzarchitekturen, Sicherheitsmechanismen, vertrauenswürdige Komponenten sowie um praxistaugliche Schutzmechanismen für moderne Kommunikationssysteme.

Das Vorhaben DeSiRe-NG stand in inhaltlich engem Zusammenhang mit den Zielen dieser Förderlinie. Im Speziellen adressierte das Projekt die folgenden zentralen Themenschwerpunkte des Programms:

- (a) Entwicklung und Erprobung moderner Netztechnologien zur Stärkung der Resilienz  
Durch die Entwicklung eines digitalisierten Messframeworks, eines intelligenten Digitalen Zwillings sowie einer adaptiven Impairment-Toolbox trägt DeSiRe-NG direkt zur Erhöhung der Robustheit und Widerstandsfähigkeit von 5G-Campusnetzen bei. Die Komponenten ermöglichen es, Netzverhalten frühzeitig zu analysieren, Störungen gezielt zu simulieren und Resilienzmaßnahmen zu bewerten – sowohl unter Laborbedingungen als auch in realitätsnahen Anwendungsszenarien.
- (b) Minimierung von Risiken beim Einsatz moderner Netztechnologien  
Die systematische Analyse potenzieller Bedrohungen (z. B. Interferenzen, Jamming, QoS-Verluste), die Entwicklung von Test- und Simulationsmethoden und die transparente Visualisierung netztechnischer Risiken adressieren explizit das Ziel, Sicherheitsbedenken beim produktiven Einsatz von 5G-Netzen frühzeitig zu erkennen und abzubauen. Der DeSiRe-NG-Ansatz liefert somit konkrete Beiträge zur Risikoprävention im industriellen und öffentlichen 5G-Einsatz.

Vor diesem Hintergrund ordnet sich DeSiRe-NG strategisch kohärent in das Portfolio anderer -in diesem Förderaufruf- geförderter Vorhaben ein. Das Vorhaben DeSiRe-NG zielt auf das Gesamtspektrum durch einen praxisnahen Systemansatz zur Analyse, Bewertung und gezielten Störungssimulation auf Netzwerkebene ab.

Es konnten im Projektverlauf keine inhaltlich überlappenden oder konkurrierenden Fördermaßnahmen identifiziert werden. Vielmehr versteht sich DeSiRe-NG als komplementäres Projekt mit hohem Integrations- und Transferpotenzial, das gezielt mit existierenden Strukturen und Ergebnissen anderer BSI-geförderter Initiativen vernetzt werden kann. Hierzu wurden bereits erste Kontakte im Rahmen gemeinsamer Veranstaltungen und Diskussionsforen (z. B. 5G/6G-Forum, Demonstrator-Events) aufgenommen.

Insgesamt leistet das Projekt einen entscheidenden Beitrag zur Umsetzung der Förderstrategie des BSI, insbesondere durch die Nutzerorientierung, technische Offenheit, übertragbare Systemarchitektur und Einbindung industrieller Praxisakteure.

## 6. Erfolge und geplante Veröffentlichungen

Das Projekt DeSiRe-NG legte von Beginn an großen Wert auf Transparenz, wissenschaftliche Sichtbarkeit und Transfer. Die im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse wurden deshalb gezielt in Fachpublikationen, Konferenzbeiträgen und Transferveranstaltungen veröffentlicht bzw. zur Veröffentlichung vorbereitet.

Die Veröffentlichungsstrategie verfolgte dabei mehrere Ziele:

- die wissenschaftliche Validierung der entwickelten Methoden und Architekturen,
- die Erhöhung der Sichtbarkeit in der Fachcommunity (u. a. 5G, Netzwerkemulation, IT-Sicherheit),
- die Anregung zur Nachnutzung und Weiterentwicklung durch Dritte sowie
- die Förderung des Technologie- und Wissenstransfers, insbesondere in KMU und mittelständische Unternehmen.

### 6.1 Bereits erfolgte Veröffentlichungen

Bis zum Zeitpunkt dieser Berichtserstellung wurden mehrere Veröffentlichungen realisiert oder zur Annahme gebracht, darunter:

- Poster Paper zur Messsystem-Architektur, vorgestellt auf der VNC 2024 (Kobe, Japan); Decentralized Framework for Measuring End-to-End Performance in 5G Networks. Der Beitrag thematisierte den Aufbau des verteilten QoS-Messsystems mit Orchestrator, Client und Endpoint – inklusive der Herausforderung räumlich-zeitlicher Zuordnung von Messdaten.
- Konferenzbeitrag zur nachhaltigen mobilen 5G+ Architektur, eingereicht und präsentiert auf der *ETFA 2024* (IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation). Der Beitrag trägt den Titel: „*Towards Sustainable Mobile Deployments of 5G+ Integrated Access and Backhaul Networks*“.
- Paper zur Emulation und Beeinträchtigungssimulation, vorgestellt auf der *IPCCC 2024* (IEEE International Performance Computing and Communications Conference, Orlando, USA). Der Beitrag stellt das Impairment-System vor und demonstriert dessen Anwendbarkeit anhand der Virtual Table Inspection.
- Einreichung zur WFCS 2025 (International IEEE Conference on Factory Communication Systems): Ein umfassender Beitrag zur Gesamtarchitektur des DeSiRe-NG-Systems, der zur Veröffentlichung angenommen wurde. Die Veröffentlichung fokussiert auf das Zusammenspiel von Digital Twin, Messsystem, Emulation und Echtzeit-Visualisierung.

### 6.2 Geplante Veröffentlichungen

Für das Jahr 2025 sind weitere Veröffentlichungen vorgesehen, u. a.:

- Einreichung eines systematischen Überblickspapiers zur gesamten Projektarchitektur in einer begutachteten Fachzeitschrift (voraussichtlich *IEEE Transactions on Industrial Informatics*).
- Beitrag zur Inter- und Extrapolationslogik des Impairment-Systems mit Fokus auf Netzwerk-Visualisierung, geplant zur Einreichung bei der *IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft)*.
- Dissemination über Open-Access-Plattformen: Ausgewählte Systemmodule sollen – sofern lizenzrechtlich möglich – in Form von Open-Source-Repositories bereitgestellt werden. Ziel ist es, die Nachnutzung der Werkzeuge (z. B. Middleware-Komponenten, Visualisierungslogik) zu ermöglichen.
- Integration in wissenschaftliche Abschlussarbeiten: Insbesondere an der TH OWL und TU Ilmenau entstehen derzeit mehrere Bachelor- und Masterarbeiten zu Teilaspekten des Projekts, u. a. zur Mobilitätsintegration in Messsysteme, zur Echtzeitvisualisierung sowie zur Weiterentwicklung der AAS-basierten Digital Twin-Modelle.

### 6.3 Öffentlichkeitsarbeit und Fachveranstaltungen

Zusätzlich zu wissenschaftlichen Publikationen war das Projekt auf einer Vielzahl von Fachveranstaltungen vertreten, eine Auswahl derer finden Sie nachfolgend.:

- *SUCCESSFUL R&I IN EUROPE 2024* (15.–16. Februar 2024, Düsseldorf)
- *DIGITALEZUKUNFT@OWL* (14. März 2024, Paderborn)
- *5G Connect Advance* (19. September 2024, Nürnberg)
- *BSI-Forum 5G/6G* (26. September 2024, Dresden)
- *5G NRWeek Jahreskonferenz* (21. November 2024, Essen)

Diese Veranstaltungen wurden genutzt, um die Projektergebnisse in Form von Vorträgen, Posterbeiträgen, Demonstratoren oder Diskussionsformaten gezielt einem Fachpublikum sowie potenziellen Anwendern vorzustellen.

Die im Projekt DeSiRe-NG entwickelten Konzepte und Werkzeuge bieten eine solide Grundlage für weiterführende Forschung im Bereich der Netzwerksicherheit und Resilienz. Insbesondere das modulare Mess- und Emulationssystem ermöglicht es, gezielt Fragestellungen zum aktiven Stören von 5G-Infrastrukturen, zur Detektion von Angriffsmustern oder zur Evaluierung von Schutzmaßnahmen unter realitätsnahen Bedingungen zu untersuchen. Darüber hinaus eröffnen sich Anschlussmöglichkeiten in Richtung automatisierter Reaktionsmechanismen, Edge-basierter Überwachung und der Integration resilienter Kommunikationsarchitekturen in kritische Infrastrukturen.