

Abschlussbericht für das Projekt

SESAM

SEcure Software-defined 5G Access network
for flexible Manufacturing

Sicheres softwaredefiniertes 5G-Zugangsnetz
für flexible Fertigungsanlagen

Teilvorhaben SESAM – LiFi

Optische Drahtlosübertragung

Förderkennzeichen: 16KIS0639K

01.05.2017 – 31.12.2021

Juni 2022

Zuwendungsempfänger:	Fraunhofer Institut für Nachrichtentechnik Heinrich-Hertz-Institut
Förderkennzeichen:	16KIS0639K
Vorhabensbezeichnung:	Sicheres softwaredefiniertes 5G-Zugangsnetz für flexible Fertigungsanlagen
Laufzeit des Vorhabens:	01.05.2017 – 31.012.2021
Berichtszeitraum:	01.05.2017 – 31.012.2021
Datum:	30.06.2022
Hauptverfasser:	Dr. Anagnostis Paraskevopoulos, Prof. Dr. Volker Jungnickel, volker.jungnickel@hhi.fraunhofer.de , 030 / 31002-768

Inhalt

1	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse im Berichtszeitraum	4
1.1	Gesamtziel des Vorhabens	4
1.2	Rolle des Fraunhofer Heinrich Hertz Instituts im Konsortium	4
1.3	AP0: Projektkoordination	4
1.4	AP1 Systemarchitektur	5
T1.1	Analyse und Konzept	5
T1.2	Bewertung	6
1.5	AP2 PHY und MAC Schichten.....	6
T2.1	PHY-Schicht.....	7
T2.2	MAC-Schicht	8
T2.3	Schnittstellen zur lokalen Steuerung.....	11
1.6	AP3 Datensicherheit.....	11
1.7	AP4 Vernetzung und Steuerung	11
T4.1	Lokale Netzsteuerung.....	11
T4.2	Algorithmen lokale Netzsteuerung	11
T4.3	Implementierung.....	12
T4.4	Test und Bewertung	12
1.8	AP5 Systemintegration	12
T5.1	Integrationskonzept	12
T5.2	Erweiterung der Hardwareplattform	13
T5.3	Integration sichere Netzarchitektur	14
1.9	AP6 Demonstration	14
T6.1	Laborexperimente	14
T6.2	Feldtests und Auswertung.....	19
2	Stand des Teilvorhabens bzgl. ursprünglicher Arbeitsplanung	20
3	Änderungen der Zielsetzung	23
4	Verwertungsplan	24
4.1	Wirtschaftliche Verwertung	24
4.2	Wissenschaftliche Verwertung.....	24
4.3	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen.....	25
4.4	Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit	25

1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse im Berichtszeitraum

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Das Hauptziel des Projektes SESAM war, ein ganzheitliches Konzept für die zuverlässige, latenzarme und sichere drahtlose Kommunikation zwischen mobilen Robotern in einer flexiblen Fertigungshalle für zukünftige Industrie 4.0 Szenarien zu entwickeln. Dafür sollten in einem heterogenen Systemansatz parallel optische als auch funkbasierte drahtlose Lösungen neben dem Festnetz genutzt werden.

Mit dem Ansatz des softwaredefinierten Netzes (SDN) sollte ein sicheres, mobiles „Cloud-RAN“ entwickelt und erprobt werden, um mobile Roboter latenzarm und auf dem kürzesten Weg mit der Cloud zu vernetzen. Die Vernetzung sollte ein latenzarmer Handover ermöglichen, der den Datenpfad zwischen den drahtlosen optischen und funkbasierten Zellen paketweise, kooperativ und prädiktiv möglichst ohne Datenverlust umschalten kann.

Im Sicherheitskonzept sollte die netzseitige Verschlüsselung schon in der Cloud, und nicht nach den drahtlosen Zugangspunkten erfolgen.

Das Projekt sollte die neuen zu entwickelnden Verfahren untersuchen und in einer Fertigungshalle realitätsnah erproben.

1.2 Rolle des Fraunhofer Heinrich Hertz Instituts im Konsortium

Der Forschungsschwerpunkt für das Fraunhofer Heinrich Hertz Institut (HHI) lag in diesem Projekt bei der LED-basierten drahtlosen Datenübertragung (Optical Wireless Communication (OWC), auch als LiFi bekannt). Auf Basis der HHI Expertise im Bereich der Nachrichtentechnik und im speziellen bei der drahtlosen Datenübertragung mit Licht sollte die optische Drahtlostechnik in eine Cloud-RAN-Architektur eingebettet werden, so dass eine Datenübertragung mit geringer Latenz und hoher Zuverlässigkeit ermöglicht wird.

Das HHI hat auch die Projektkoordination übernommen.

1.3 AP0: Projektkoordination

Neben den im Folgenden dargestellten Ergebnissen in den Arbeitspaketen AP1 bis AP6 wurden im übergeordneten AP0: *Projektkoordination* folgende, nicht wissenschaftlich-technische Ziele verfolgt:

- Organisation von Projektmeetings, Abstimmung der Projektplanung und Aktualisierung der Projektziele
- Abstimmung des Ablaufs der Teilprojekte
- Teilnahme als Koordinator bei den Aktivitäten der Begleitforschung, Beantwortung von Informationsanfragen

Bedingt durch die Coronavirus-Pandemie haben die meisten Projektmeetings virtuell stattgefunden. Das HHI hat als Projektkoordinator auch die Umstrukturierung des Projektkonsortiums umgesetzt, die durch den Wegfall des Projektpartners R&S notwendig wurde.

Ebenfalls bedingt durch die Coronavirus-Pandemie erwies sich die schon erfolgte mehrfache Verlängerung der Projektlaufzeit bis Ende 2021 als zu kurz, um zu einer finalen Demonstration beim neugewonnenen assoziierten Partner Weidmüller KG (WEID) zu kommen.

1.4 AP1 Systemarchitektur

Ziel des *AP1 Systemarchitektur* war es, das heterogene optische und Funkübertragungssystem gemeinsam mit den Partnern zu definieren und spezifizieren. Die Ergebnisse von AP1 lieferten wertvolle Angaben zu den Rahmenbedingungen für die Arbeiten in AP2, AP3, AP4.

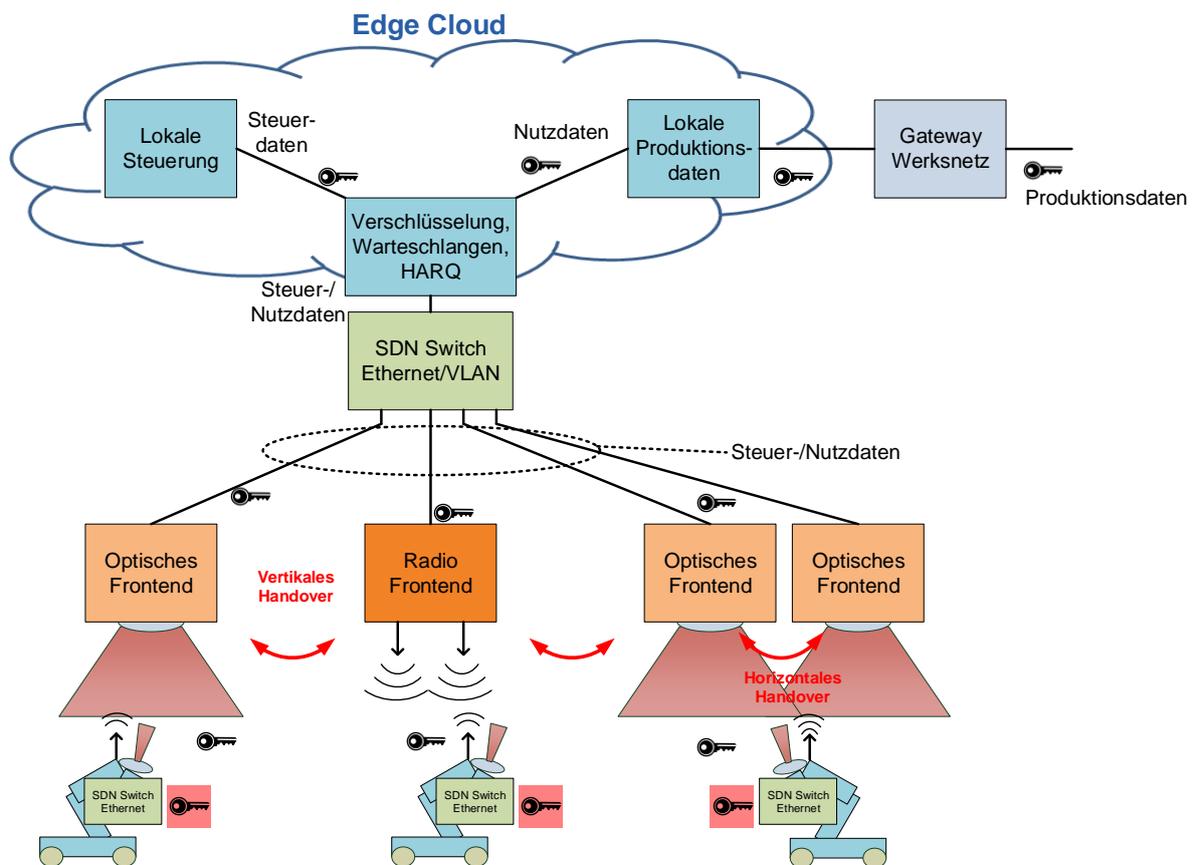


Abbildung 1 Schematische Darstellung des aktualisierten Systemkonzeptes für die mobile Datenübertragung in einer industriellen Produktionsumgebung

T1.1 Analyse und Konzept

Im Teilarbeitspaket T1.1 wurden die Anwendungsszenarien und Anforderungen der geplanten Lösung definiert. Dazu wurde ein Industrie 4.0 Szenario zugrunde gelegt, das die neue Mobilitäts- und Sicherheitsarchitektur für eine programmierbare Fabrik berücksichtigt.

Folgende Ziele wurden erreicht:

- Grundlegendes Verständnis der Anforderungen, insbesondere durch Analyse der Gegebenheiten in der Produktion beim assoziierten Partner BMW

- Erarbeitung des Systemkonzepts, inkl. der Einbringung von Kenntnissen im Bereich optischer Drahtloskommunikation seitens HHI. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung der geplanten Systemarchitektur.
- Festlegung der vertikalen Handover-Strategie in Abstimmung mit den anderen Projektpartnern
- Abstimmung der Aufgaben pro Partner im Gesamtkonzept
- Untersuchungen zum G.hn MAC Protokoll hinsichtlich horizontalem Handover bei LiFi
- Das auf Makrodiversität basierende, flexible Konzept von SESAM wurde mit den beiden aktiven Standardisierungsgruppen bei ITU-T (G.vlc) und IEEE 802.15.13¹ diskutiert, mit dem Ergebnis, die notwendigen Tools in einen verteilten Mehrnutzer MIMO Ansatz zu integrieren. Dieser Beschluss hatte wesentliche Auswirkungen auf die weitere Projektarbeit, und diente dazu, die Relevanz der in SESAM erarbeiteten Techniken zu erhöhen.
- Definition einer ersten physikalischen Schicht (PHY) für die industrielle Anwendung, basierend auf dem sogenannten Pulsed-Modulation PHY (PM PHY)

T1.2 Bewertung

Anhand der unterschiedlichen Eigenschaften der beiden Drahtlostechniken LiFi und Funk konnten in T1.2 erste Aussagen zur e2e-Latenz (end-to-end) beim horizontalen und vertikalen Handover getroffen werden. Parallel dazu wurden verschiedene Angriffs- und Störszenarien betrachtet und das mit der neuen Architektur erreichbare Sicherheitsniveau bewertet. Anhand der Ergebnisse konnten konkrete Schritte erarbeitet werden, wie die Architektur im Projekt weiter optimiert werden kann.

Folgende Ziele wurden erreicht:

- Erste Tests hinsichtlich Qualitätsmonitoring, Latenz und Sicherheit der Verbindungen der drahtlos-optischen und Funkschnittstellen wurden individuell bei den Partnern durchgeführt
- Die Analyse hat ergeben, dass das G.hn Protokoll das Multipunkt-zu-Multipunkt Szenario für LiFi-Anwendungen nicht ausreichend abdecken kann.
- Um die Rahmenbedingungen im Projekt zu erfüllen, wären in der MAC-Schicht des G.hn Protokolls wesentliche Änderungen notwendig.
- Hinsichtlich der PHY-Schicht erschienen häufigere Kanalschätzungen notwendig.
- Die notwendigen Systemaspekte wurden in Abstimmung mit den Projektpartnern in einer entsprechenden Konzeptbeschreibung zusammengefasst.

1.5 AP2 PHY und MAC Schichten

In *AP2 PHY und MAC Schichten* wurden die unteren Schichten des konvergenten, auf optischen und funkbasierten drahtlosen sowie drahtgebundenen mobilen Übertragungssystems für die industrielle Kommunikation entwickelt. Als Basis zu diesen Arbeiten diente die in AP1 definierte Systemarchitektur. Ergebnisse aus AP2 flossen in die Arbeiten zur Datensicherheit in AP3 zur Netzsteuerung in AP4 und zur Systemintegration in AP5 ein.

¹ <https://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/TG13.html>
<https://homegridforum.org/q-hn-in-the-premises/>

T2.1 PHY-Schicht

In T2.1 sollte die untere PHY Schicht an die Anforderungen von 5G und industriellem Internet angepasst, bewertet und optimiert werden. Hierzu sollte ein Matlab-Modell entwickelt werden, welches auch als Grundlage für die Echtzeitimplementierung der Algorithmen in AP5 dienen sollte.

Folgende Ziele wurden erreicht:

- Evaluierung verschiedener Plattform Ansätze zur Umsetzung des Gesamtkonzepts
- Festlegung der optischen und der Funkplattform (WiFi, 5G,..) und damit Einigung auf PHY Grundlagen
- Untersuchung der Diversitätsanforderungen bei einer Anordnung von mehreren optischen Sendern und Empfängern
- Entwicklung eines ersten PHY Konzepts und Abstimmung mit der laufenden Standardisierung

Für den industriellen Anwendungsfall ist die spektrale Effizienz nachrangig. Höhere Bedeutung hat die Zuverlässigkeit der Verbindung, also Robustheit gegen Verbindungsabbrüche und ungünstige Übertragungskanäle. Um diese Anforderungen zu gewährleisten, wurden gepulste Modulationsverfahren untersucht, die eine geringere spektrale Effizienz, aber höhere Energieeffizienz aufweisen. Dies ermöglicht die Kommunikation auch bei schlechteren Kanalbedingungen mit gleicher Sendeleistung. Hier wurde die einfachste Form der gepulsten Modulation, PAM-2 bzw. On-Off-Keying (OOK), untersucht. Für die Detektion der Framestarts und die Übertragung von Header- sowie Payload-Daten wurden Verfahren entsprechend der IEEE 802.15.13 Standardisierung berücksichtigt.

In weiteren Simulationen wurde der Einfluss der elektrischen Eigenschaften analoger Frontends auf die Datenübertragung untersucht. Hierfür wurden diese Frontends durch Bandpassfilter modelliert und ein Datensignal mit einer Samplerate von 25 MHz ohne Entzerrung über einen AWGN-Kanal übertragen. Zur Einordnung der Ergebnisse wurde ein Modell einer Multipunkt-zu-Punkt-Übertragung im Down- bzw. Punkt-zu-Multipunkt im Uplink entwickelt (s. Abbildung 2), aus dem sich eine Verteilung von SNR-Werten ergab.

Die Simulationen zeigten, dass eine zuverlässige Übertragung im Downlink (SNR: 15 bis 32 dB) generell möglich ist. Im Uplink (SNR: 3 bis 21 dB) sind jedoch weitere Maßnahmen notwendig, um die Akkumulation von Rauschsignalen zu vermeiden. Weiterhin wurde die Grenzfrequenz der als Hochpass wirkenden Komponenten in den Frontends sichtbar und zeigte damit die Grenzen für die Qualität der Übertragung auf (s. Abbildung 3).²

² M. Hinrichs et al., "A Physical Layer for Low Power Optical Wireless Communications," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 5, no. 1, pp. 4–17, Mar. 2021, doi: 10.1109/TGCN.2020.3038692.

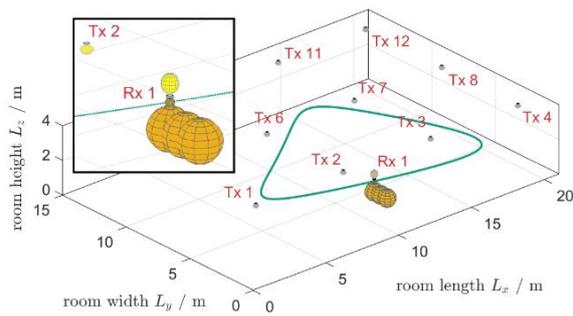


Abbildung 2 Simuliertes Szenario der Multipunkt-zu-Punkt-Übertragung

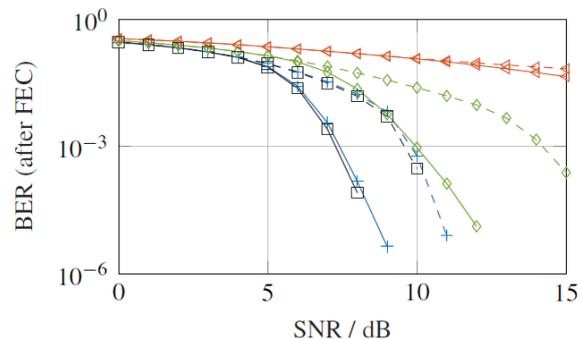


Abbildung 3 BER über SNR mit verschiedenen Hochpass-Grenzfrequenzen im Empfängerfrontend

Diese Ergebnisse sind in die Arbeiten von AP5 Systemintegration eingeflossen und wurden auch bei der IEEE 802.15.13 Standardisierung berücksichtigt.

T2.2 MAC-Schicht

In T2.2 sollte die untere MAC Schicht an die Anforderungen von 5G und industriellem Internet angepasst, bewertet und optimiert werden. Ähnlich wie in T2.1, sollte hierzu ein Modell entwickelt werden, welches auch als Grundlage für die Echtzeimplementierung der Algorithmen in AP5 dienen sollte.

Folgende Ziele wurden erreicht:

- Analyse und Definition eines geeigneten Handover-Konzepts zur Implementierung der Roaming Architektur zwischen optischer und Funkübertragung in Abstimmung mit den Projektpartnern. Es wurde entschieden, den vertikalen Handover auf der Netzwerkschicht zu implementieren. Diese Empfehlung kam auch aus der 802.11 Study Group on Light Communication³.
- Um kabellose Industriekommunikation über LiFi zu unterstützen, wurde ein angepasstes MAC-Protokoll entwickelt, welches einen MIMO-Ansatz berücksichtigt.
- Die entwickelte Lösung unterstützt räumliches Multiplexing. Der eigentliche Medienzugriff wird durch ein dynamisches TDMA koordiniert.
- Zur Bewertung auf Systemebene wurde das MAC-Protokoll mit dem Netzwerksimulator ns-3⁴ implementiert.
- Als eine der ersten Untersuchungen wurde der Übergang eines mobilen Nutzers zwischen zwei LiFi Zugangspunkten simuliert. Der Datenstrom bestand aus UDP-Paketen mit gleichbleibender Größe.

Die Anforderungen an die Dienstgüte für industrielle Kommunikation beinhalten vorrangig die Einhaltung niedriger und wenig variierender Latenzen zwischen den Kommunikationsteilnehmern. Weiterhin muss die Paketfehlerrate möglichst geringgehalten werden. Ein hoher Durchsatz spielt für

³ https://standards.ieee.org/news/2017/light_communications/

⁴ <https://www.nsnam.org/>

die meisten Anwendungen nur eine nachrangige Rolle. Der MAC-Layer für LiFi sollte die Mobilität der Kommunikationsteilnehmer mit möglichst gleichbleibender Dienstgüte unterstützen.

Um kabellose Industriekommunikation über LiFi zu unterstützen, wurde ein angepasstes MAC-Protokoll entwickelt. Die Erfolgsrate, im Sinne eines geringen Paketverlustes, der kabellosen Datenübertragungen wird dabei durch einen MIMO-Ansatz erhöht. Hierbei wird räumliche Diversität genutzt, um die Übertragung gegenüber Abschattung und Unterbrechung einzelner Sichtlinien robuster zu machen. Durch die räumliche Verteilung der optischen Zugangspunkte an der Decke wird die Notwendigkeit eines horizontalen Handovers zwischen zwei optischen Drahtlosverbindungen beseitigt.

Innerhalb der Abdeckungsfläche wird räumliches Multiplexing unterstützt. Das heißt, mehrere mobile Nutzer können gleichzeitig senden oder empfangen, wenn sie so weit voneinander entfernt sind, dass die Beeinträchtigung der Übertragungen durch Interferenz ausgeschlossen werden kann. Der eigentliche Medienzugriff wird durch ein dynamisches TDMA koordiniert. Somit können Übertragungen einzelner Nutzer deterministisch geplant werden und kommen ohne stochastische Zugriffsverfahren aus, die die Dienstgüte der Kommunikation nicht garantieren können.

Zur Bewertung auf Systemebene wurde das MAC-Protokoll für den Netzwerksimulator ns-3 implementiert. Die Arbeiten umfassten dabei die Abbildung der essenziellen Datenpakete und Protokoll-Prozeduren. Die physikalische Schicht wurde dabei hinreichend modelliert, um MIMO-Übertragungen abzubilden. In verschiedenen Szenarien wurden Datenübertragungen zwischen verschiedenen Kommunikationsteilnehmern simuliert. In den Szenarien wurden unterschiedliche Datenströme ausgetauscht. Für alle Szenarien wurden verschiedene Leistungsdaten, wie die Paketfehlerrate (*Packet Error Rate*, PER), Durchsatz, Ende-zu-Ende-Latenz und *Signal-to-interference-and-noise-ratio* (SINR) erhoben.

Als eine der ersten Untersuchungen wurde der Übergang eines mobilen Nutzers zwischen zwei LiFi Zugangspunkten, wie in Abbildung 4 dargestellt, simuliert. Der Datenstrom umfasste UDP-Pakete mit gleichbleibender Größe.

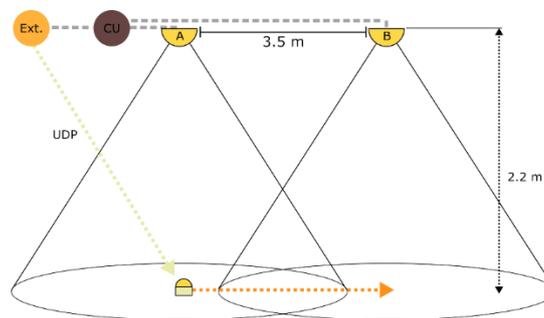


Abbildung 4 Untersuchtes Szenario für das Handover zwischen zwei LiFi-Zugangspunkten

Dabei wurde der Fall, bei dem der mobile Nutzer stets von maximal einem LiFi Zugangspunkt bedient werden kann mit dem Fall verglichen, bei dem optische räumliche Diversität angewendet wird. Abbildung 5 zeigt die berechneten SINR-Werte, die sich für Übertragungen vom Zugangspunkt zum mobilen Nutzer ergaben. Es ist erkennbar, dass bei dem Szenario mit nur einem Zugangspunkt das SINR beim Übergang zwischen den Zellen deutlich absinkt. Ein niedrigeres SINR geht dabei mit einer

niedrigeren physikalischen Datenrate einher. Wenn im Modell die Möglichkeit berücksichtigt wird, Übertragungen zum mobilen Nutzer mittels zweier Zugangspunkte im Verbund durchzuführen, wird die konstruktive Nutzung der Signale beider Zugangspunkte am Zellenrand ermöglicht. In Abbildung 5 ist deutlich zu erkennen, dass in diesem Fall die SINR-Werte für Datenübertragungen während der Mobilität stabiler ausfallen.

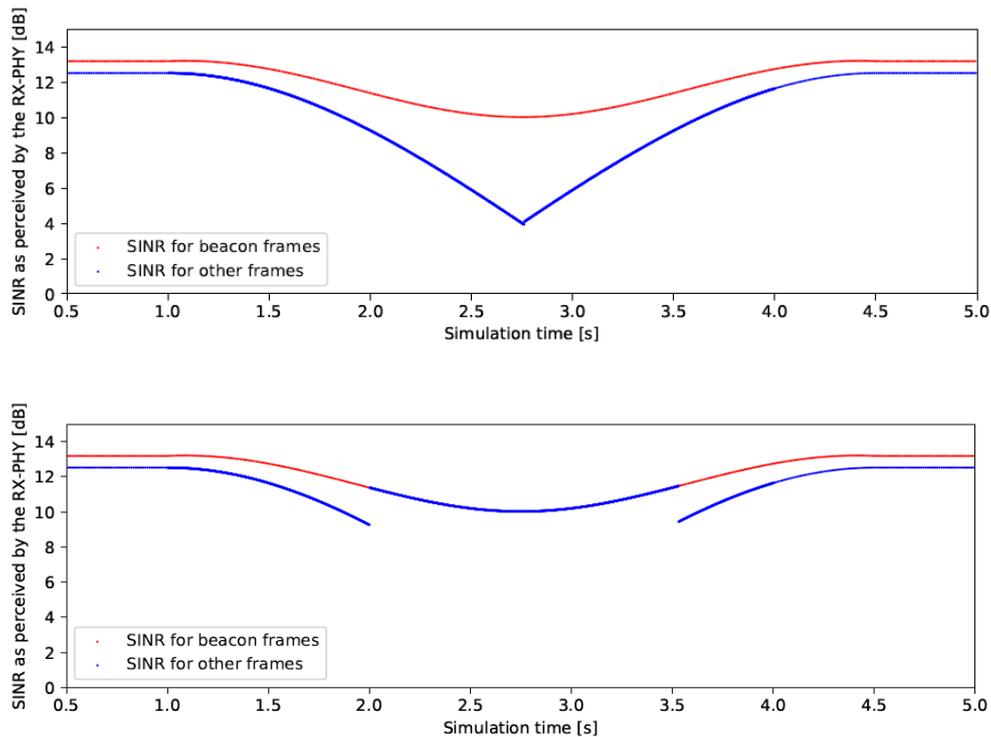


Abbildung 5 Simulationsergebnisse für das SINR der am mobilen Nutzer empfangene Frames bei der in Abbildung 4 gezeigten Nutzerbewegung bei Verwendung separater Datenübertragung pro Zugangspunkt (oben) und einer gebündelten Datenübertragung (unten). Das berechnete SINR für die Datenframes bestätigt die Robustheit der optischen räumlichen Diversität.

Die erfolgte Spezifikation der entwickelten MAC-Schicht beinhaltet essenzielle Details, die zur Implementierung eines Gesamtsystems notwendig sind. Diese sind insbesondere Frameformate, Protokoll-Prozeduren und Schnittstellen zu höheren Protokollschichten. Parallel zur Festlegung der Spezifikation wurden konkrete Details daraus in die vorhandene Simulationsumgebung eingepflegt. Dies ermöglicht eine genauere Evaluierung und Fehleridentifizierung im Spezifizierungsprozess. Die untersuchten Verfahren und Ergebnisse flossen mit in die Fassungen des Standards IEEE 802.15.13 ein⁵.

Die Spezifikation der entworfenen MAC-Schicht zusammen mit der in T2.1 entworfenen PHY-Schicht dienen in AP5 als Grundlage für eine teilweise Implementierung des prototypischen Systems (s. T5.2).

⁵ V. Jungnickel et al., "LiFi for Industrial Wireless Applications," 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2020, pp. 1-3.

T2.3 Schnittstellen zur lokalen Steuerung

In T2.3 sollten offene Schnittstellen zur lokalen Netzsteuerung spezifiziert werden, die sich am OpenFlow-Protokoll orientieren. Mit ihrer Hilfe sollten kritische PHY- und MAC-Parameter, wie die Auswahl der benutzen OFDM-Träger, Leistung, Modulation, Kanalkodierung etc. vonseiten der lokalen Netzsteuerung einstellbar sein.

Im Verlauf des Projektes stellte sich heraus, dass dieser Beitrag zur lokalen Netzsteuerung mit einem Zugriff in den eingesetzten DSP-Chip verbunden wäre. Trotz Nachfrage beim Chiphersteller wurde der Zugang zur Firmware des Chipsatzes nicht ermöglicht. Aus diesem Grund, aber letztendlich auch aus der Motivation heraus, eine zuverlässige Lösung bereitzustellen, wurden diese Ziele nicht weiterverfolgt. Die entsprechenden Ressourcen wurden in anderen Teilarbeitspaketen verteilt.

1.6 AP3 Datensicherheit

Ziel des *AP3 Datensicherheit* war die Entwicklung eines globalen Sicherheitskonzeptes für ein zentralisiertes Cloud-RAN mit dem Fokus auf Anwendungen mit erhöhten Sicherheitsbedürfnisse im Industriebereich. Als Basis zu diesen Arbeiten diente die in AP1 definierte Systemarchitektur. Ein Schwerpunkt lag auf der Beurteilung der die in diesem Rahmen neuartigen optischen Kommunikationstechnologie, ein weiterer auf der SDN-konformen Verknüpfung dieser Technologie mit der IT-Sicherheit. In diesem Sinne sollten die Ergebnisse aus AP3 sowohl die Entwicklung in AP4 unterstützen als auch die Basis für die Systemintegration in AP5 darstellen.

Der Schwerpunkt der Arbeiten lag beim Projektpartner R&S und später bei den Projektpartnern R3COMS und BISDN. Das HHI hat die Diskussion zwischen den Projektpartnern koordiniert.

1.7 AP4 Vernetzung und Steuerung

In *AP4 Vernetzung und Steuerung* wurde die lokale Netzsteuerung entwickelt mit dem Ziel, ein implementierbares Gesamtkonzept zu erstellen, das alle wichtigen Aspekte für die industrielle Kommunikation beinhaltet. Als Basis für diese Entwicklung diente die in AP1 definierte Systemarchitektur. Darüber hinaus lieferten die Ergebnisse aus AP2 und AP3 wertvolle Beiträge für AP4.

T4.1 Lokale Netzsteuerung

In T4.1 wurde ein Konzept für die gemeinsame Steuerung der Mobilität und Sicherheit für ein latenz- und sicherheitskritisches Anwendungsumfeld, ebenso wie für die notwendige Software für die Netzsteuerung entworfen.

Durch Abstimmung mit den Projektpartnern wurde erkenntlich, dass die Steuerung sich auf einen latenzarmen vertikalen Handover beschränken sollte. Somit strukturiert sich die lokale Netzsteuerung in den MIMO MAC für LiFi, den Wi-Fi MAC für den EchoRing und eine darüber liegende, lokale Instanz des 5G Core Netzwerks, über welche die Produktionsdaten und das externe Netz angeschlossen sind.

Der Schwerpunkt dieser Arbeiten lag beim Projektpartner BISDN.

T4.2 Algorithmen lokale Netzsteuerung

In T4.2 wurden die Algorithmen zur zentralen Netzsteuerung umfassend untersucht und entwickelt.

Der Schwerpunkt dieser Arbeiten lag beim Projektpartner BISDN.

T4.3 Implementierung

In T4.3 sollten die optimierten Algorithmen in Matlab und exemplarisch für die geplanten Demonstratoren auch in Echtzeit implementiert werden.

Durch die Entscheidung, die Steuerung auf einen latenzarmen vertikalen Handover zu beschränken, waren die geplanten HHI-Aktivitäten nicht mehr notwendig. Die entsprechenden Ressourcen wurden in anderen Teilarbeitspaketen, hauptsächlich bei der Systemintegration, verteilt.

T4.4. Test und Bewertung

In T4.4 sollten die entwickelten Algorithmen umfassend getestet und ihre Leistungsfähigkeit in realitätsnahen Szenarien bewertet werden, um durch eine Optimierung des Systems die geforderten Parameter bzgl. Verfügbarkeit, Latenz und Datenrate zu erreichen.

Zu diesem Ziel wurden von den Projektpartnern BISDN und R3COMS notwendige Hard- und Software bereitgestellt, um im HHI die vorgesehenen Tests zur lokalen Netzsteuerung durchzuführen. Der vorgesehene vertikale Handover konnte somit demonstriert werden, und die das Systemparameter konnten entsprechend konfiguriert werden. Eine erste Demonstration dieser Lösung wurde vor Ort beim Begleitforschungstreffen in September 2019 in Dresden live vorgestellt. Damit wurden die Voraussetzungen erreicht, um die Systemdemonstration (s. AP6) durchzuführen, bei der weitere Systemeigenschaften untersucht werden sollten.

1.8 AP5 Systemintegration

Schlüsselfunktionen wie lokale Netzsteuerung, Organisation der Datenflüsse über einen SDN-fähigen Switch, gruppenfähige Verschlüsselung sowie horizontaler und vertikaler Handover und die Interferenzkoordination wurden in *AP5 Systemintegration* exemplarisch auch in Echtzeit implementiert und getestet. Die Arbeiten in den AP2, AP3 und AP4 haben wesentliche Ergebnisse für die Untersuchungen in AP5 beigetragen.

T5.1 Integrationskonzept

Hierfür wurde in T5.1 ein übergreifendes Implementierungskonzept entwickelt. Abbildung 6 zeigt das Gesamtkonzept für die Systemintegration. Die Umsetzung auf einer Echtzeit-fähigen Hardwareplattform erfolgte in T5.2.

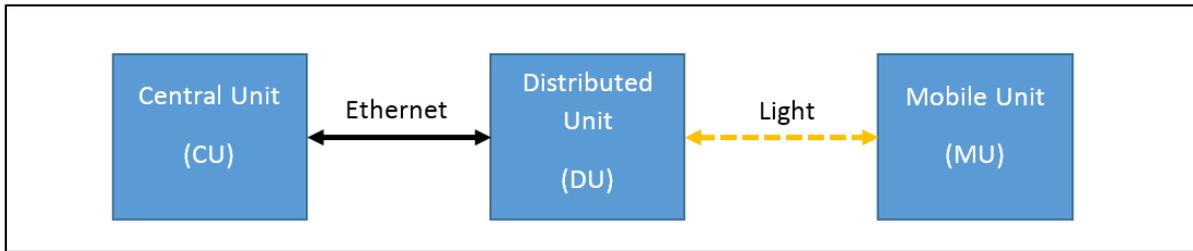


Abbildung 6 Integrationskonzept des LiFi-Systems. Es besteht aus der Central Unit (CU), dem digitalen Ethernet Fronthaul zwischen der CU und den optischen Zugangspunkten (distributed unit - DU), den DUs, die LiFi Verbindungen zwischen DUs und mobilen Geräten (mobile unit - MU) ermöglichen.

T5.2 Erweiterung der Hardwareplattform

Das in T5.1 entwickelte Implementierungskonzept wurde in T5.2 auf einer Echtzeit-fähigen Hardwareplattform umgesetzt.

Folgende Ergebnisse wurden erreicht:

- Die Implementierung des PM PHY Senders und des PM PHY Empfängers basierend auf dem IEEE P802.15.13 Standard auf einem FPGA Xilinx Zync 7000 wurde abgeschlossen. Die Funktionsweise von Sender und Empfänger wurde in Labortests verifiziert.
- Eine erste Version der Implementierung der verteilten MAC-Paketverarbeitung in Software, basierend auf dem Standard IEEE P802.15.13, wurde fertiggestellt.
- Eine erste funktionsfähige Version des Ethernet Fronthaul Protocols wurde implementiert.
- Das Interface zur Netzwerkschicht und eine Frequenzsynchronisierung via SyncE wurden implementiert.
- Die Hardware-Komponenten wurden in Industriestandard-19“-Gehäuse integriert und mit dem PM PHY erfolgreich getestet (s. Abbildung 7).

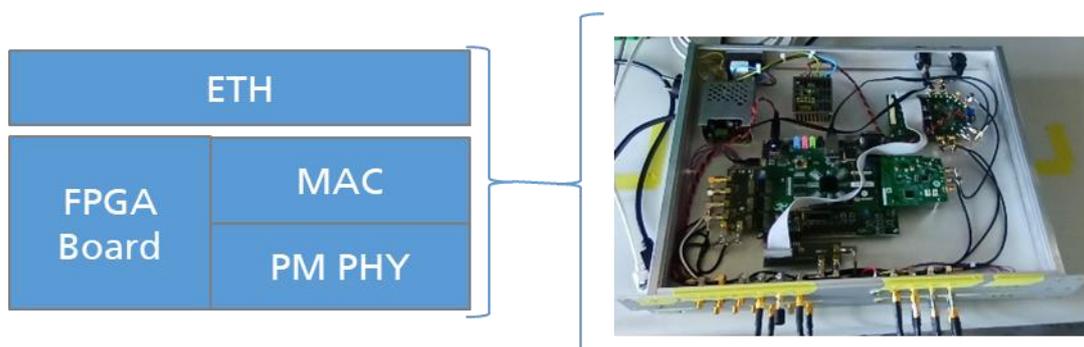


Abbildung 7 FPGA-basierende Echtzeitimplementierung des PM-PHY. Die dafür notwendige Hardware, die entsprechende Funktionalitäten erfüllen soll (links), wurde in ein 19“-Gehäuse integriert (rechts).

Somit wurden die Voraussetzungen erfüllt, um einen ersten Demonstrator intern am HHI aufzubauen, der eine unidirektionale Übertragung im Downlink ermöglicht (s. T6.1).

T5.3 Integration sichere Netzarchitektur

Die nach der Übernahme der R&S Aufgaben durch BISDN und R3COMS angepassten Sicherheitsfunktionen wurde in T5.3 in die zentrale Netzsteuerung, die drahtlosen Zugangspunkte und in die Endgeräte integriert.

Der Schwerpunkt dieser Arbeiten lag beim Projektpartner R&S und später bei den Projektpartnern BISDN und R3COMS.

1.9 AP6 Demonstration

Für eine wirksame Außendarstellung der geplanten Forschungsarbeiten, wie auch zur Verbesserung der Verwertungschancen nach Projektabschluss, sollten die Projektergebnisse in einem anwendungsnahen Umfeld demonstriert werden. Auf Basis der Ergebnisse zur Systemintegration in AP5 sollten die neuartigen Systemkonzepte vorgestellt und das Feedback potentieller Nutzer gewonnen werden.

Der ursprüngliche Plan sah eine Demonstration beim assoziierten Partner BMW vor. Leider konnte diese Planung nicht weiterverfolgt werden, denn die dafür angedachten Räumlichkeiten standen aus firmeninternen Gründen nicht mehr zur Verfügung. Durch den Gewinn eines weiteren assoziierten Partners (Fa. Weidmüller KG (WEID)) konnten die Arbeiten fortgesetzt werden.

Trotz einer detaillierten Planung und einer sorgfältigen Vorbereitung musste eine erste geplante Demonstration bedingt durch die Corona-Pandemie kurzfristig abgesagt werden. Auch eine genehmigte Projektverlängerung führte leider zu keinem Erfolg. Nichtsdestotrotz konnten bei den Laborexperimenten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, die auch die Verwertungschancen eindeutig erhöhen.

T6.1 Laborexperimente

Ursprünglich sollten in T6.1 die Schlüsselfunktionen und ihr Zusammenspiel exemplarisch im Labor erprobt werden. Dieser Plan wurde im Laufe der Arbeiten erweitert, um möglichst viele Tests vor der Installation beim Projektpartner WEID durchzuführen und somit die Erfolgchancen der Feldtests (T6.2) zu erhöhen.

Das Szenario für die finale Systemdemonstration wird in Abbildung 8 schematisch dargestellt. Die dafür notwendigen Systemkomponenten wurden von allen Partnern bereitgestellt. Wie in Abbildung 9 ersichtlich, fand die Demonstration des Gesamtsystems in Räumen des HHI statt. Dabei konnten sowohl der schnelle vertikale Handover zwischen dem LiFi-Link und dem EchoRing, wie auch der robuste horizontale Handover innerhalb der jeweiligen Übertragungssysteme demonstriert werden. Zu diesem Zweck wurden zwei optische LiFi-Zellen aufgebaut, deren Anordnung flexibel variiert werden konnte, um die Gegebenheiten bei WEID widerzuspiegeln.

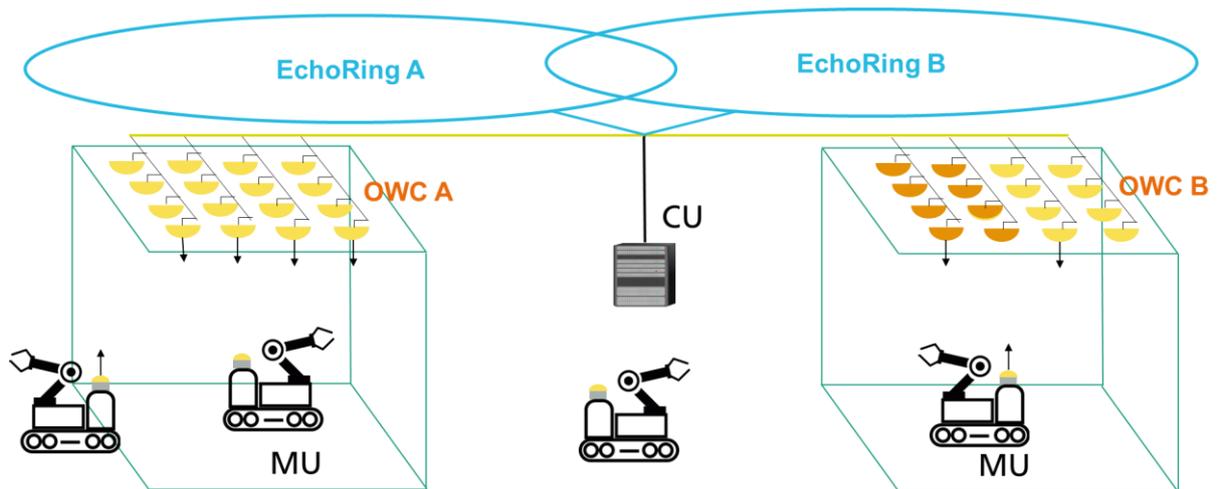


Abbildung 8 Schematische Gesamtdarstellung des Demonstrators für das SESAM-Projekt. OWC: optische Drahtloskommunikation, MU: Mobile Einheit, CU: Central Unit

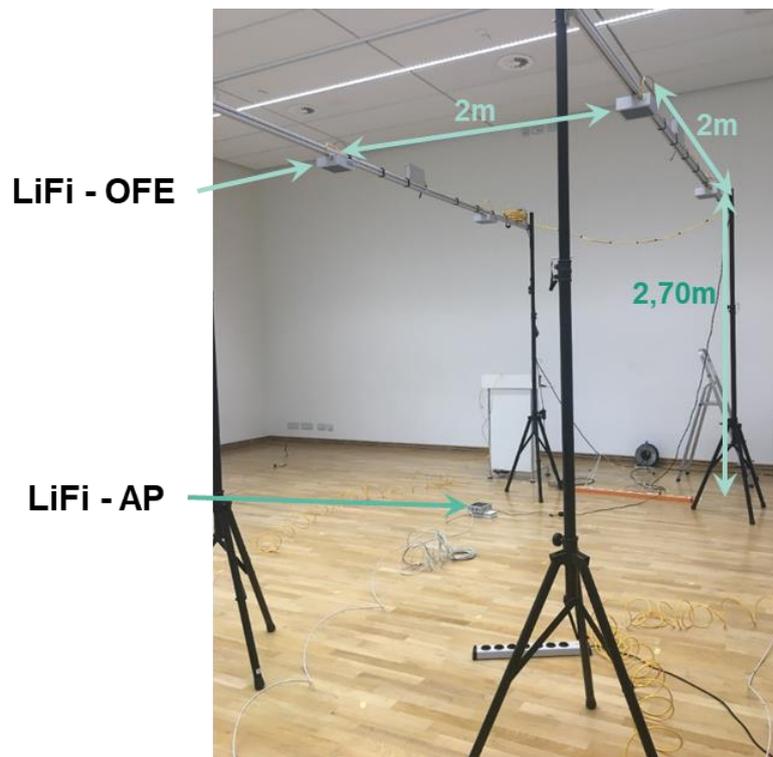


Abbildung 9 Teilaufnahme des SESAM-Demonstrators im Hörsaal des HHI. Die Positionierung der LiFi-Frontends (LiFi-OFE) entsprach auch der geplanten Aufteilung für die vorgesehenen Feldtests. Das LiFi-AP (auf dem Boden) ist Teil der Mobile Unit (MU) sein. Im Bild nicht gezeigt sind die fünf Echoring-APs, die das Echoring-System abbildeten.

Für die Auswertung der Ergebnisse wurde hauptsächlich ein Protokoll-Tester eingesetzt, mit dem die Übertragung von Ethernet-Datenpaketen in unterschiedlichen Längen und bei unterschiedlichen Übertragungsraten ausgewertet werden kann.

Zusammenfassend konnten demonstriert werden:

- Eine fehlerfreie Übertragung – auch bei sich ständig bewegender „Mobile Unit“ - mit Hilfe von EchoRing bei einer Datenrate bis 1 Mbit/s.
- Ebenfalls eine fehlerfreie Paketübertragung innerhalb des LiFi-Links. Bei sich bewegender „Mobile Unit“ war die Datenrate niedriger im Vergleich zur theoretisch möglichen.
- Schneller vertikaler Handover LiFi/EchoRing mit geringem Paketverlust. Eine „Umschaltzeit“ bis 2ms ohne Beeinträchtigung der Datenübertragung wurde erreicht.

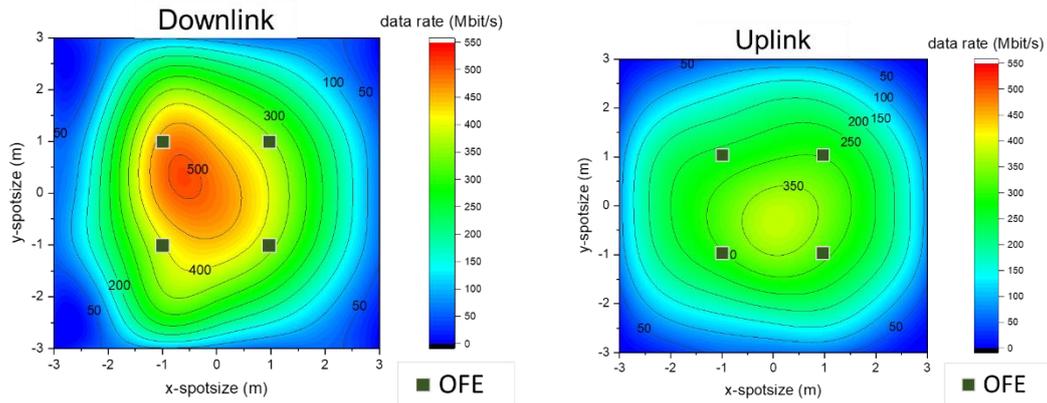


Abbildung 10 Auswertung der Bruttodatenrate für eine LiFi-Zelle mit vier OFEs, die in einer Höhe von ca. 3 m aufgestellt wurden. Die Down- und Uplink Datenratenverteilung zeigt, dass innerhalb einer Fläche von ca. 25 m² sehr hohe Datenraten erreicht werden konnten.

Die verwendeten LiFi-Module basieren auf einem kommerziellen DSP-Chip, der die Datenrate dynamisch an die Kanalbedingungen anpasst. Somit konnte eine optische Datenverbindung in einer großen Fläche realisiert werden. Wie in Abbildung 10 gezeigt, konnten bei der getesteten Anordnung sehr hohe Bruttodatenraten innerhalb einer 25m² Fläche demonstriert werden. Diese Fläche wurde vom Projektpartner Weidmüller als ausreichend bestätigt, um eine schnelle Datenverbindung rund um eine Produktionsanlage herzustellen.

Der horizontale Handover innerhalb der LiFi-Zelle wurde separat untersucht. In einer ersten Phase wurden statische Tests durchgeführt, bei denen die MU nicht bewegt wurde. Die Datenrate wurde kontinuierlich am Protokolltester erhöht und die Verbindung ausgewertet. Wie in Tabelle 1 ersichtlich, wird eine fehlerlose Übertragung auch bei höheren Datenraten erreicht, die das Potenzial der Verbindung ausschöpfen. Gleichzeitig erkennt man, dass bei hohen Datenraten erhöhte Latenzwerte (>10 ms) beobachtet wurden, die mit der Datenverarbeitung innerhalb des DSP-Chips verbunden sind.

Distance and lateral shift	Gross data rate (Mbps)	Bitrate (Mbps)	Meas. frame loss	Min. latency (ms)	Average latency (ms)	Max. latency (ms)
1 m + 60 cm	525	82.56	0	0.11	0.23	2.61
		206.40	0	0.08	0.35	2.19
		371.52	0	0.18	0.95	8.33
		412.80	0	0.14	1.52	15.87
		421.05	0	0.15	1.98	10.60
		425.18	114470	0.09	72.95	76.57

Tabelle 1 Auswertung der Paketverluste und der Übertragungslatenz bei einer statischen LiFi-Verbindung. Eine fehlerfreie Übertragung wird bis zur maximal möglichen Nettodatenrate (ca. 420 Mbit/s) erreicht.

Wenn man allerdings das Szenario einer beweglichen MU umsetzt, ergibt sich ein anderes Bild bei der Datenübertragung. Wie in Tabelle 2 dargestellt, hängen hier die Grenzen einer fehlerlosen Übertragung mit dem Bereich, in dem sich die MU bewegt, zusammen. Begrenzt sich die Bewegung auf Bereiche mit hohen statischen Datenraten, werden die Erwartungen auf eine schnelle, fehlerlose Verbindung erfüllt. Wenn aber die MU sich auch in Bereichen mit niedrigen statischen Datenraten bewegt, dann können nur fehlerlose Verbindungen mit der niedrigstmöglichen Datenrate erreicht werden. Erwähnenswert sind auch die beobachteten hohen Latenzwerte (max. 200 ms). Diese wurden auf die Anwendung des G.hn Standards zurückgeführt, bei dem wiederholte Paketübertragungen vorgesehen sind. Gleichzeitig hat eine statistische Auswertung der Verteilung der Latenzwerte gezeigt, dass diese Werte nur sehr selten (im Bereich 0,001%) vorkommen.

Lateralshift (cm)	Gross data rate (Mbps)	Speed	Bitrate (Mbps)	Meas. frame loss	Min. lat. (ms)	Av. lat. (ms)	Max. lat. (ms)
0-60	525-860	slow	557.28	0	0.18	0.94	8.31
		med.	557.28	0	0.15	2.07	49.78
		high	557.28	0	0.17	1.93	34.16
0-120	139-860	slow	107.33	0	0.10	0.66	24.53
		med.	111.46	0	0.10	10.77	269.01
		high	99.07	0	0.09	3.72	186.76

Tabelle 2 Auswertung der Paketverluste und der Übertragungslatenz bei einer dynamischen LiFi-Verbindung, bei der die MU mit unterschiedlichen Geschwindigkeit bewegt wurde. Die Ergebnisse für eine fehlerfreie Datenübertragung hängen stark mit dem Bereich zusammen, in dem die MU bewegt wurde.

Für den vertikalen Handover wurden sogenannte BIRD-Geräte des Partners BISDN eingesetzt, bei dem die BFD-Software⁶ die Datenverbindung kontrolliert hat. Die LiFi-Verbindung wurde dann gezielt unterbrochen, um einen vertikalen Handover zu verursachen. Wegen der Latenzwerte des EchoRing Systems wurde hierbei eine „Umschaltzeit“ von 5 ms, bei einer Datenrate von 1 Mbit/s erreicht, welche vom EchoRing limitiert wurde.

Um eine bessere statistische Auswertung zu ermöglichen, wurde der LiFi-Link fünfmal unterbrochen und dabei die Paketverluste und Latenz in Echtzeit beobachtet. Dabei wurden Paketverluste nur beim Umschalten von LiFi zu EchoRing beobachtet. Die intelligente Netzsteuerung sorgte dafür, dass im umgekehrten Fall ein fehlerfreier Handover erfolgen konnte. Dadurch blieben auch die totalen Paketverluste bei 0.024% pro Test (d.h. durchschnittlich 0.005% per Umschalten) extrem niedrig⁷.

Diese Ergebnisse sollten eine solide Basis für die in T6.2 vorgesehenen Systemtests in einer Produktionsumgebung ermöglichen. Da diese Demonstration wegen der Corona-Pandemie leider nicht stattfinden konnte, stellen sie auch die Endergebnisse für die Systemdemonstration dar.

Parallel dazu wurde die Arbeiten zu einer Echtzeit-fähigen Hardwareplattform fortgeführt. Das entsprechende FPGA-basierte System wurde so weiterentwickelt, dass zwischen der in Abbildung 6 dargestellten CU und MU bidirektionaler Datenverkehr unterstützt werden kann (s.

⁶ <https://ipccisco.com/lesson/bfd/>

⁷ A. Paraskevopoulos et al., „Software-defined LiFi - RF network for Industry 4.0 applications“, to be presented at the 48th Annual Conference of the Industrial Electronics Society - IECON 2022 Conference

Abbildung 11). Das umfasste vor Allem die prototypische Entwicklung diverser Funktionalitäten des entworfenen Kommunikationsprotokolls. So wurde ein auf der Reservierung von Zeitschlitzen basierender Medienzugriff sowie die spezifizierten Paketformate implementiert.



Abbildung 11 Versuchsaufbau für die FPGA-basierende Echtzeitimplementierung der optischen Drahtlosübertragung mit den Geräten zur DU-Signalverarbeitung (links) und zur Mobile Unit (rechts)

Das System für die drahtlose Kommunikation, u.a. für Web-Browsing, Videostreaming, sowie ein einfaches Netzwerk-Spiel getestet (s. Abbildung 12). Ein Einfaches Dashboard zur Visualisierung der Datenraten wurde ebenfalls entwickelt. Hierdurch konnte die Basisfunktionalität des Systems gezeigt werden. Zusätzliche Tests zeigten, dass die Synchronisationsgenauigkeit der DUs ausreicht, um MISO-Übertragungen zu unterstützen und somit die für industrielle Kommunikation wichtige Zuverlässigkeit durch räumliche Diversität zu erhöhen.



Abbildung 12 Demonstratoraufbau für die FPGA-basierende Echtzeitimplementierung der optischen Drahtlosübertragung. Die Basisfunktionalität des Systems wurde beispielhaft durch ein einfaches Netzwerkspiel gezeigt.

Eine Weiterentwicklung ist auch nach Ende des Projektes vorgesehen, u.a. um eine weitere physikalische Übertragungsschicht, welche durch an anderes Modulationsverfahren höhere Bandbreiten verspricht, zu evaluieren, sowie eine höhere Anzahl von DUs an einer einzigen CU zu erlauben.

T6.2 Feldtests und Auswertung

Nach erfolgreicher Demonstration der Netzwerkfunktionen für eine latenzarme und sichere Datenübertragung in einer Laborumgebung (T6.1) sollten in T6.2 Systemexperimente in Produktionsumgebungen unter realitätsnahen Bedingungen durchgeführt werden. Somit sollten wichtige Erkenntnisse für die Optimierung der Netzarchitektur gewonnen und die Verwertungschancen der entwickelten Lösung erhöht werden.

Der Projektpartner Weidmüller KG hatte dafür eine Produktionshalle am Standort Wutha-Farnroda zur Verfügung gestellt, in der die SESAM-Systemdemonstration stattfinden sollte. Ein entsprechendes Szenario für die Systemdemonstration wurde entwickelt und abgestimmt (s. Abbildung 13). Dieses Szenario wurde auch bei den Laborsystemtests (T6.1) berücksichtigt.

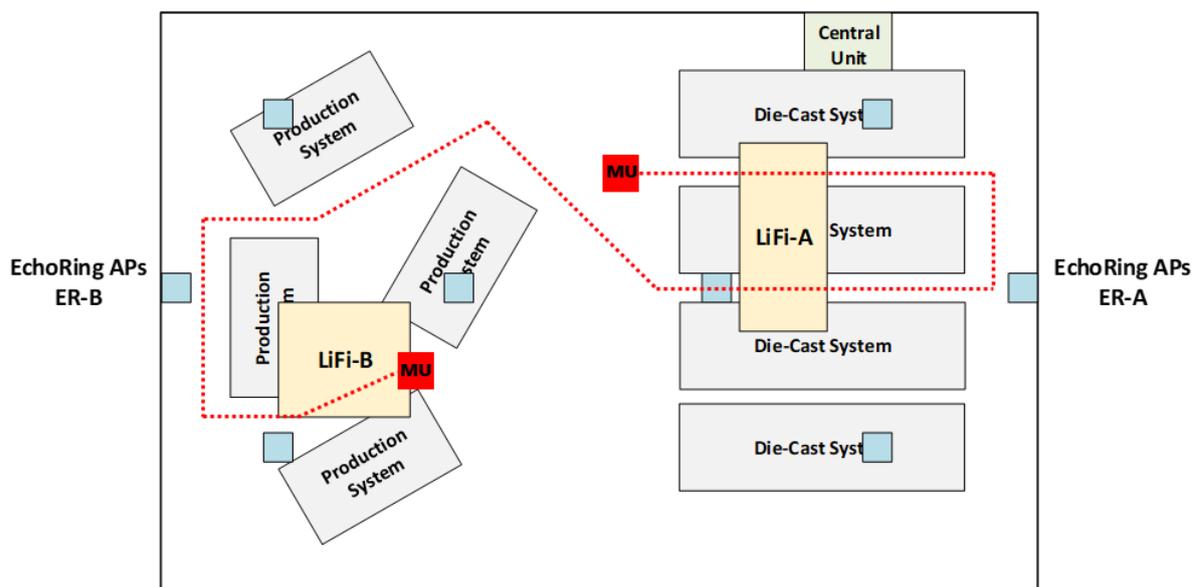


Abbildung 13 Schematische Darstellung des Szenarios für die Systemdemonstration in der Produktionshalle der Weidmüller KG. Die Mobile Unit (MU) würde sich frei in der Halle bewegen. Je nach Position sollte die kontinuierliche Datenübertragung per EchoRing oder LiFi erfolgen. Leider hat die Corona-Pandemie eine Realisierung verhindert.

Leider hat die Coronavirus-Pandemie die Systeminstallation und –demonstration verhindert. Es wurde eine Projektverlängerung bis Ende 2021 vereinbart. Die Entwicklung der Pandemie und die entsprechende Priorisierung zum Schutz der Belegschaft haben die Systemdemonstration beim Projektpartner Weidmüller leider nicht möglich gemacht. Aus dem Hintergrund, dass die Labortests (s. AP1.6) unter ähnlichen Bedingungen wie in der Produktionshalle durchgeführt wurden, kann davon ausgegangen werden, dass dadurch die wesentlichen technischen Erkenntnisse gewonnen werden konnten.

2 Stand des Teilvorhabens bzgl. ursprünglicher Arbeitsplanung

SESAM Arbeitspakete	Jahr 1				Jahr 2				Jahr 3				Jahr 4				Jahr 5
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14	Q15	Q16	Q17
AP0: Projektkoordination	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>
AP1: Systemarchitektur	>	>															
T1.1 Analyse und Konzept	■																
T1.2 Bewertung	■	■															
AP2: PHY und MAC Schichten		>	>	>	>	>	>	>									
T2.1 PHY Schicht		■	■	■	■	■											
T2.1 MAC Schicht		■	■	■	■	■											
T2.2 Schnittstellen zur lokalen Steuerung				■	■	■	■	■									
AP3: Datensicherheit		>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	
T3.1 Sicherheitskonzept		■	■														
T3.2 Gruppenverschlüsselung			■	■	■	■											
T3.3 Sicherheit im SDN					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
T3.4 Implementierung							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP4: Vernetzung und Steuerung			>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	
T4.1 Konzept lokale Netzsteuerung			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
T4.2 Algorithmen lokale Netzsteuerung						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
T4.3 Implementierung							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
T4.4 Test und Bewertung									■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP5: Systemintegration						>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>
T5.1 Integrationskonzept						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
T5.2 Erweiterung der Hardwareplattform						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
T5.3 Integration sichere Netzarchitektur									■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP6: Demonstration						>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>
T6.1 Laborexperimente						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
T6.2 Feldtests und Auswertung								■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Abbildung 14 Aktualisierter Zeitplan für die Arbeiten im Rahmen des SESAM-Projektes

Wie auch in Abbildung 14 ersichtlich, verfolgten die Projektaktivitäten in den ersten zwei Jahren den vorgesehenen Zeitplan. Verzögerungen ergaben sich zunächst durch den Wegfall des Projektpartners R&S und die Übernahme der Aktivitäten von den Partnern R3COMS und BISDN. Aus diesem Grund ergab sich eine kostenneutrale Verlängerung um sechs Monate.

In der letzten Projektphase hat die Corona-Pandemie die Planung für eine Systemdemonstration beeinträchtigt. In der Hoffnung, die aus Projektsicht wichtige Systemdemonstration beim Projektpartner WEID zu realisieren, wurde eine Verlängerung bis Ende 2021 vereinbart.

Abbildung 15 und Tabelle 3 zeigen die im SESAM-Projekt vorgesehenen Meilensteine, die alle erledigt werden konnten mit einer Ausnahme (M6.2 2. Systemdemo), wie bereits erläutert wurde.

SESAM	Jahr 1				Jahr 2				Jahr 3				Jahr 4				Jahr 5
Arbeitspakete/Meilensteine	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14	Q15	Q16	Q17
AP0: Projektkoordination	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>
M0.1 Kick-off meeting	■																
M0.2 1. Jahres-Statustreffen				■													
M0.3 2. Jahres-Statustreffen								■									
M0.4 Abschlussmeeting																	■
AP1: Systemarchitektur	>	>															
M1.1 Analyse	■																
M1.2 Systemarchitektur/ Bewertungsergebnisse		■															
AP2: PHY und MAC Schichten		>	>	>	>	>	>	>									
M2.1 Erste Spezifikation PHY und MAC Schichten		■															
M2.2 Vollständige Spezifikation						■											
M2.3 Spezifikation der SDN Schnittstellen								■									
AP3: Datensicherheit		>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>
M3.1 Dezentrale Sicherheitskonzepte		■															
M3.2 Realisierungskonzept mit Gefährdungsbeurteilung			■														
M3.3 Gruppenfähige Verschlüsselungsalgorithmen											■						■
M3.4 Verschlüsselungsintegration mit SDN											■						■
AP4: Vernetzung und Steuerung			>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>
M4.1 Funktionsdefinition zur lokalen Netzsteuerung				■													
M4.2 Testumgebung und erste Ergebnisse verfügbar								■									
M4.3 Abschließende Performanceanalyse Netzsteuerung												■					■
AP5: Systemintegration					>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>
M5.1 Implementierungskonzept für Echtzeit Untersuchungen							■										
M5.2 Erweiterung der Hardwareplattform										■							
M5.3 Implementierung von SDN Schnittstellen										■							
M5.4 Integration Drahtloshardware mit SDN-Netzwerk											■						■
AP6: Demonstration					>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>
M6.1 1. Systemdemo								■									
M6.2 2. Systemdemo																	■

Abbildung 15 Aktualisierter Zeitplan für die Meilensteine im Rahmen des SESAM-Projektes

Meilenstein	Bezeichnung	Erfüllt durch	Fällig am (Quartal)	Status
M0.1	Kick-off	Ein Meeting zur Abstimmung aller Termine und einzelnen Arbeitsschritte zwischen den einzelnen Projektpartnern findet statt. Die Vorgehensweise wurde mit dem Projektträger abgesprochen.	Q1	Das Kick-off Meeting hat am 08.06.17 stattgefunden
M1.1	Analyse	Die Zielapplikationen, die im Rahmen des Projekts bearbeitet werden sollen, wurden festgelegt.	Q1	Weitestgehend erfüllt. Eventuelle Nachjustierung im Rahmen von AP4.
M1.2	Systemarchitektur/ Bewertungsergebnisse	Der „Plugtest“ mit dem System im momentanen technischen Stand wurde in der Fertigungszelle durchgeführt. Die Arbeitsziele, Systemgrenzen und bisherigen Ergebnisse des Projekts wurden in der Arbeitsdokumentation erfasst.	Q2 → Q4	In Q4 erledigt

Meilenstein	Bezeichnung	Erfüllt durch	Fällig am (Quartal)	Status
M2.1	Erste Spezifikation PHY und MAC Schichten	Analyse der Anforderungen erfolgt, spezifische Ziele für PHY und MAC wurden definiert.	Q2 → Q4	In Q4 erledigt
M3.1	Dezentrale Sicherheitskonzepte	Die Anforderungen an die Systemsicherheit werden vollständig erfasst und analysiert. Es erfolgt eine Definition der spezifischen Ziele an das zentral-gesteuerte aber dezentral agierende Sicherheitskonzept.	Q2	Erledigt
M3.2	Realisierungskonzept mit Gefährdungsbeurteilung	Es erfolgt die mehrwertige Technologieauswahl für die Umsetzung des Sicherheitskonzepts in M3.1 und eine daraus resultierende variabel skalierte Gefährdungsbeurteilung.	Q3 → Q7	Eine Gefährdungsbeurteilung hat stattgefunden. Durch den Ausstieg des Projektpartners R&S war eine Änderung der Zielsetzung hinsichtlich Technologieauswahl notwendig. In Q7 erledigt.
M0.2	1. Jahresreview und 1. Zwischenbericht	Ein Projektmeeting mit allen Beteiligten und mit dem Projektträger findet statt. Die Projektpartner tauschen sich über die Ergebnisse und Erfahrungen aus, leiten ggf. Maßnahmen ab und vereinbaren weitere Termine.	Q4	Erledigt
M4.1	Funktionsdefinition zur lokalen Netzsteuerung	Die Funktionen der lokalen Netzsteuerung wurden in Abstimmung mit AP2 und AP3 definiert.	Q4	Erledigt
M2.2	Vollständige Spezifikation	Zusätzliche Aspekte von AP3 und AP4 werden berücksichtigt	Q6 → Q7	In Q7 erledigt.
M4.2	Testumgebung und erste Ergebnisse verfügbar	Der Aufbau der Cloud Testumgebung wurde abgeschlossen und erste Tests wurden durchgeführt.	Q7 → Q9	In Q9 erledigt
M5.1	Implementierungskonzept für Echtzeit Untersuchungen	Entwicklung erster Algorithmen erfolgt, Auswahl für Implementierung getroffen	Q7 → Q9	In Q9 erledigt
M0.3	2. Jahresreview und 2. Zwischenbericht	Ein Projektmeeting mit allen Beteiligten und mit dem Projektträger findet statt. Die Projektpartner tauschen sich über die Ergebnisse und Erfahrungen aus, leiten ggf. Maßnahmen ab und vereinbaren weitere Termine.	Q8 → Q9	Es haben mehrere Projektmeetings und Workshops stattgefunden. Ein Review-Meeting mit Beteiligung des Projektträgers hat am 08.05.19 stattgefunden.
M2.3	Spezifikation der SDN Schnittstellen	PHY und MAC Schichten erfüllen SDN Anforderungen	Q8 → Q9	In Q9 erledigt
M6.1	1. Systemdemo	Die 1. Systemdemonstration wird vorgeführt, um die Robustheit des entwickelten Datenübertragungssystems zu belegen	Q8 → Q10	Erste Demonstration vom vertikalen Handover vorgestellt. In Q10 erledigt.

Meilenstein	Bezeichnung	Erfüllt durch	Fällig am (Quartal)	Status
M3.3	Gruppenfähige Verschlüsselungsalgorithmen	Die entwickelten Verschlüsselungsalgorithmen erfüllen die erforderliche Variabilität der Schutzgrade des SDNs je kommunizierender Gruppe.	Q10 → Q16	In Q16 erledigt.
M3.4	Verschlüsselungsintegration mit SDN	Die gewählten Verschlüsselungstechnologien und Sicherheitskonzepte erfüllen die SDN Anforderungen	Q10 → Q16	In Q16 erledigt.
M4.3	Abschließende Performanceanalyse Netzsteuerung	Die abschließende Performance Analyse wurde durchgeführt. Sie beinhaltet Messungen zur Latenz, zum Ressourcenverbrauch und zur Skalierbarkeit.	Q11 → Q16	In Q16 erledigt.
M5.2	Erweiterung der Hardwareplattform	Notwendige Hardware Komponenten für die optische und Funkübertragung sind vorhanden	Q9 → Q13	In Q13 erledigt
M5.3	Implementierung von SDN Schnittstellen	Notwendigen SDN-Schnittstellen sind implementiert	Q10 → Q14	In Q14 erledigt
M5.4	Integration Drahtloshardware mit SDN-Netzwerk	Notwendige Integrationskriterien sind erfüllt, wodurch auch die Erstellung des 2. Systemdemonstrators ermöglicht wird	Q11 → Q16	In Q16 erledigt.
M6.2	2. Systemdemo	Die 2. Systemdemonstration wird vorgeführt, um die Implementierung von weiterentwickelten Lösungsansätzen zu belegen. Erkenntnisse aus der Systemdemonstration sind in einem Kurzbericht zusammengefasst, der Bestandteil des Abschlussberichtes sein wird.	Q12 → Q17	Szenario und Standort für Systemdemonstration vorhanden. Szenario konnte wegen Corona-Pandemie nicht realisiert werden

Tabelle 3 Aktualisierte Auflistung der Meilensteine im SESAM-Projekt

3 Änderungen der Zielsetzung

Für das Teilprojekt SESAM-LiFi waren keine wesentlichen Änderungen der Zielsetzung erforderlich. Lediglich Teilaktivitäten, wie z.B. bei der Netzsteuerung, wurden nach der Erarbeitung der Systemspezifikationen angepasst.

Zum Thema Datensicherheit gab es ebenfalls größere Anpassungen der Zielsetzung –aber keine Zieländerung - durch den Wegfall des Projektpartners R&S und die Übernahme der Aktivitäten bei R3COMS und BISDN.

4 Verwertungsplan

4.1 Wirtschaftliche Verwertung

Hier gibt es keine inhaltlichen Änderungen gegenüber dem Projektantrag. Die dort getroffenen Aussagen wirtschaftlicher Verwertung sind nach wie vor gültig.

Das HHI als Institut der gemeinnützigen Fraunhofer Gesellschaft (FhG) hat zum Ziel, die angewandte Forschung und den damit verbundenen Technologietransfer zur Industrie zu fördern. Die Nutzung der Projektergebnisse erfolgt daher indirekt in Form enger Zusammenarbeit mit den Industriepartnern. Durch die enge Kooperation mit den Projektpartnern ist eine direkte Umsetzung des Know-hows mit dem Ziel einer späteren Produktentwicklung gewährleistet, wobei es im Interesse der FhG liegt, Folgeaufträge von den Industriepartnern einzuwerben.

Ebenfalls wichtig für die Entwicklung zukünftiger Produkte ist auch die Beteiligung vom HHI an der Gestaltung des zukünftigen IEEE 802.15.13 Standards ausschlaggebend.

4.2 Wissenschaftliche Verwertung

Hier gibt es ebenfalls keine inhaltlichen Änderungen gegenüber dem Projektantrag. Die dort getroffenen Aussagen zur wissenschaftlichen Verwertung sind nach wie vor gültig.

Im Projekt SESAM ist erstmals ein vertieftes Verständnis der spezifischen Anforderungen für flächendeckende mobile Kommunikationssysteme im industriellen Umfeld entstanden. Die Projektaktivitäten haben bestätigt, dass die industriellen LiFi-Anwendungen ein wichtiges Kompetenzfeld mit hoher Praxisrelevanz darstellen. Die erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen akademischen und Industrie-Partnern ermöglichte die gezielte Verfolgung von anwendungsorientierten Zielen.

So wie das in Vorgängerprojekten erarbeitete Know-how in das SESAM-Vorhaben einfließen konnte, werden auch die erzielten Projektergebnisse in weiteren Projekten Anwendungen finden. Insbesondere der verlustarme Handover zwischen funk- und optikbasierten Drahtlosnetzen sind auch für weitere Forschungsvorhaben vom großen Interesse, so wie die FPGA-basierte Implementierung der PHY- und MAC-Layer.

Die wissenschaftlichen Ergebnisse wurden auf Konferenzen vorgestellt und in international anerkannten Fachzeitschriften publiziert:

[1] M. Hinrichs, B. Poddig, M. Nölle, P. Hellwig, R. Freund, and V. Jungnickel, "Efficient Line Coding for Low-Power Optical Wireless Communications," in 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall), Sep. 2021, pp. 1–7. doi: 10.1109/VTC2021-Fall52928.2021.9625557.

[2] M. Hinrichs et al., "A Physical Layer for Low Power Optical Wireless Communications," IEEE Transactions on Green Communications and Networking, vol. 5, no. 1, pp. 4–17, Mar. 2021, doi: 10.1109/TGCN.2020.3038692.

[3] M. Hinrichs et al., "Demonstration of Optical Wireless Communications Using the Pulsed Modulation PHY in IEEE 802.15.13," in 2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Jul. 2020, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICTON51198.2020.9203161.

- [4] M. Hinrichs, P. Wilke Berenguer, R. Freund, and V. Jungnickel, "Advanced Physical Layer Design for Li-Fi in the Industrial Internet of Things," 2019. doi: 10.1364/sppcom.2019.spth3e.4.
- [5] M. Hinrichs et al., "Pulsed Modulation PHY for Power Efficient Optical Wireless Communication," in ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC), May 2019, pp. 1–7. doi: 10.1109/ICC.2019.8761150.
- [6] S. Mohammadi Kouhini et al., "Performance of Bidirectional LiFi over Plastic Optical Fiber (POF)," 2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/CSNDSP49049.2020.9249500.
- [7] V. Jungnickel, „LiFi für Fertigungszellen und vernetzte Straßenleuchten. Zuverlässig genug für Autobauer und Mobilfunk“, Elektronik, August 2020
- [8] V. Jungnickel et al., "LiFi for Industrial Wireless Applications," 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2020, pp. 1-3.
- [9] A. Zubow, P. Gawłowicz, K. L. Bober, V. Jungnickel, K. Habel and F. Dressler, "Hy-Fi: Aggregation of LiFi and WiFi using MIMO in IEEE 802.11," 2021 IEEE 22nd International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2021, pp. 100-108, doi: 10.1109/WoWMoM51794.2021.00023.
- [10] K. L. Bober et al., "Distributed Multiuser MIMO for LiFi in Industrial Wireless Applications," in Journal of Lightwave Technology, vol. 39, no. 11, pp. 3420-3433, June1, 2021, doi: 10.1109/JLT.2021.3069186.
- [11] A. Paraskevopoulos et al., "Software-defined LiFi - RF network for Industry 4.0 applications", to be presented at the 48th Annual Conference of the Industrial Electronics Society - IECON 2022 Conference

Im Rahmen des Projektes entstanden ebenfalls vier Masterarbeiten zu der Projektthematik.

4.3 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Es wurden im Rahmen des Projektes keine Schutzrechte angemeldet.

4.4 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Die im SESAM-Vorhaben entwickelten Verfahren und Lösungen können von der Industrie unmittelbar eingesetzt werden. Insbesondere die kooperierenden KMUs (BISDN, R3COMS) konnten durch die Projektaktivitäten wertvolle Erkenntnisse über die LiFi-Spezifikationen und Interfaces gewinnen und wurden somit in die Lage versetzt, neue technologische Lösungen anzubieten.

Aus dem SESAM-Projekt werden für die vom HHI bereitgestellten optischen Module Folgeaufträge erwartet. Insbesondere sieht das HHI in seiner Teilnahme an SESAM auch eine Möglichkeit, existierende Schutzrechte in die Standardisierung einzubringen, sie gleichzeitig in die praktische Anwendung zu überführen und über die sich daraus langfristig ergebenden Lizenzverträge zusätzliche Industrieerlöse zu erzielen.

Ebenfalls wird seitens HHI ein großes Potenzial für die FPGA-basierte Echtzeitimplementierung erkannt. Aus diesem Grund wird die Strategie verfolgt, sowohl eine „Open Lab“ Systemtestumgebung,

wie auch Simulationswerkzeuge in Form einer „Software Suite“ anzubieten. Erste Schritte (z.B. Einrichtung dedizierter Webseiten, Press-Release) wurden in dieser Richtung unternommen.

Das in SESAM erworbene Know-how soll auch weiterführende Forschungsprojekte ermöglichen, um die Expertise zu dieser Thematik zu erweitern. Erwähnenswert hierzu sind sowohl ein um ein Jahr versetzt laufendes EU-Projekt (ELIOT), wie auch ein neulich gestartetes BMBF-Projekt (LINCNET).

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht
3. Titel Abschlussbericht für das Projekt SESAM - SEcure Software-defined 5G Access network for flexible Manufacturing	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Paraskevopoulos, Anagnostis Jungnickel, Volker Schulz, Dominic	5. Abschlussdatum des Vorhabens Dezember 2021
	6. Veröffentlichungsdatum June 2022
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 16KIS0639K
	11. Seitenzahl 26
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 7
	14. Tabellen 2
	15. Abbildungen 14
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Das Hauptziel des Projektes SESAM war, ein Konzept für die zuverlässige drahtlose Kommunikation zwischen mobilen Robotern für zukünftige Industrie 4.0 Szenarien zu entwickeln. Dafür sollten parallel optische als auch funkbasierte drahtlose Lösungen genutzt werden. Der Forschungsschwerpunkt für das Fraunhofer Heinrich Hertz Institut (HHI) lag in diesem Projekt bei der LED-basierten drahtlosen Datenübertragung (LiFi). Das HHI hat auch die Projektkoordination übernommen.	
19. Schlagwörter Optical Wireless Communication, drahtlose Kommunikation in der Industrie	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Final report for the project SESAM - SEcure Software-defined 5G Access network for flexible Manufacturing	
4. author(s) (family name, first name(s)) Paraskevopoulos, Anagnostis Jungnickel, Volker Schulz, Dominic	5. end of project December 2021
	6. publication date June 2022
	7. form of publication report
8. performing organization(s) (name, address) Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut	9. originator's report no.
	10. reference no. 16KIS0639K
	11. no. of pages 26
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 7
	14. no. of tables 2
	15. no. of figures 14
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract The main goal of the SESAM project was to develop a concept for reliable wireless communication between mobile robots for future Industry 4.0 scenarios. Optical and radio-based wireless solutions should be used in parallel for this. The research focus for the Fraunhofer Heinrich Hertz Institute (HHI) in this project was LED-based wireless data transmission (LiFi). The HHI has also taken over the project coordination.	
19. keywords Optical wireless communication, wireless industrial communication	
20. publisher	21. price