

forschung im fokus

[Flipped Mastery: Probleme lösen lernen]

Lehransatz in der akademischen Lehre | 8

[LogIKTram]

Nachhaltiger straßenbahnbasierter Gütertransport | 66

[Export Credits and the Climate Transition]

Klimafinanzierung für „Net Zero“-Ziele | 108





Prof. Dr.-Ing. Axel Sikora
(4.v.l.) und sein ivESK-
Team

Das „Internet der Dinge“ (Internet of Things, IoT) durchdringt die industriellen und persönlichen Anwendungen zunehmend. Hierzu zählen beispielsweise Smart-Metering und Smart-Grid, Industrie- und Prozessautomation, Car-to-Car, bzw. Car-to-X-Kommunikation, Heim- und Gebäudeautomation, Telehealth- und Telecare-Anwendungen. Die drahtgebundene und drahtlose Vernetzung von Embedded Systemen und deren Anbindung als sogenannte cyberphysische Systems (CPS) spielen hierbei eine immer wichtigere Rolle. Da auch immer mehr Systeme funktionskritische Aufgaben autonom übernehmen, gewinnen Zuverlässigkeit und Sicherheit immer mehr an Bedeutung. Entsprechend müssen die Aspekte der Datensicherheit (Security) und der Privatsphäre (Privacy) ebenfalls und von Anfang berücksichtigt werden. Besondere Themenschwerpunkte sind gegenwärtig die in diesem Bericht vorgestellten Themenkreise der zellularen Mobilkommunikation (5G/5.xG/6G), die echtzeitfähige Kommunikation insbesondere unter Nutzung der Ansätze des Time Sensitive Networking (TSN), Absicherungssysteme sowohl auf Protokoll- als auch auf Anwendungsebene (Beitrag von Herrn Welte und Herrn Ghovanlooy über die Nutzung von Blockchains für industrielle Anwendungen) und Low-Power Wide-Area Networks (LPWAN), in dem eine interessante Neuentwicklung von Manuel Schappacher in seinem Beitrag beschrieben wird.

Das Institut für verlässliche Embedded Systems und Kommunikationselektronik (ivESK) an der Hochschule Offenburg wurde im Herbst 2015 von Prof. Dr. Axel Sikora und Prof. Dr. Dirk Westhoff gegründet und hat sich seither außerordentlich positiv entwickelt. Seit Herbst 2020 ist Prof. Dr. Andreas Schaad Teil des Teams. Es werden pro Jahr etwa 20 Forschungs- und Entwicklungsprojekte oft in enger Kooperation mit Unternehmen und anderen Forschungseinrichtungen bearbeitet, um das Internet der Dinge effizienter, zuverlässiger und verlässlicher zu machen.

Am Institut arbeiten gegenwärtig 15 Vollzeitmitarbeiter sowie etwa ebenso viele Studierende in einem sehr internationalen, hochmotivierten und lebendigen Team. Regelmäßig sind Gastwissenschaftler aus der ganzen Welt vor Ort, um neue Themen zu erschließen. Aufgrund der weiterhin sehr positiven Projektlage sind eigentlich immer Projekt- und Promotionsstellen verfügbar. Kandidaten für Tutorentätigkeiten und Abschlussarbeiten sind ebenso gerne gesehen. Promotionen können über die Assoziierung von Prof. Dr. Sikora an die Technische Fakultät der Universität Freiburg unmittelbar betreut werden.

Institutsleitung

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Axel Sikora

Blockchain für verlässliche Prozesse in der Industrieautomation

Dominik Welte M.Sc., Fatemeh Ghovanlooy Ghajar M.Sc. M.S., Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Axel Sikora

Die Blockchain-Technologien sind nicht nur für Kryptowährungen viel diskutiert. Auch die Chancen und Probleme beim Einsatz im industriellen Umfeld sind noch nicht hinreichend erforscht. Hierzu leistet das Dipper-Projekt Beiträge, um den Einsatz zu erleichtern. Dazu wird zusammen mit Partnern von der KNUST aus Kumasi (Ghana) eine Lösung für die Absicherung der Lebensmittelproduktion in ländlichen Gebieten entwickelt.

Blockchain technologies are not only much discussed for cryptocurrencies. The opportunities and problems of using them in an industrial environment have not yet been sufficiently researched. The Dipper – “Distributed IoT-Platforms for Safe Food Production – in Education, Research and Industry” project is making contributions to facilitate their use. A solution for securing food production in rural areas is being developed together with partners from the “Kwame Nkrumah University of Science and Technology” in Kumasi (Ghana).

Blockchain im industriellen Umfeld

Blockchain-Technologien werden oft vor allem mit den zahlreichen Kryptowährungen assoziiert, doch auch im industriellen Umfeld kann die Technologie vorteilhaft eingesetzt werden. Dabei muss der Einsatz allerdings wohlüberlegt sein, denn obwohl oft als solche angepriesen, ist die Blockchain allemal kein Wundermittel, welches alle Probleme lösen kann und dabei auch noch sicher, verteilt und effizient ist. Allgemein lässt sich die Blockchain als verkettete Liste von Transaktionen beschreiben. Da diese Liste kryptografisch verkettet ist und zudem dezentral abgespeichert wird, lassen sich auf diese Weise Daten manipulationssicher abspeichern. Die Blockchain-Technologie wurde erstmalig 2008 durch das Paper allgemein bekannt, welches die Grundlage für Bitcoin bildet [1].

Der Blockchain-Typ, der im industriellen Umfeld oftmals eingesetzt wird, wird den sogenannten privaten (permissioned) Blockchains zugeordnet. Das bedeutet zum einen, dass nicht jeder Zugriff auf das Netzwerk hat. Der Zugriff muss explizit von einem oder mehreren der Betreiber gewährt werden. Zum anderen gibt es sehr oft ein striktes Rollen- und Rechtemanagement innerhalb der Blockchain: So kann beispielsweise festgelegt werden, welche Benutzergruppen bestimmte Operationen durchführen können oder wer genau eine Transaktion validieren kann oder darf. Um das Rechtemanagement zu ermöglichen, müssen

die Identitäten (inklusive ihrer Gruppenzugehörigkeit) innerhalb des Netzwerkes bekannt sein. Blockchain-Puristen rümpfen hier schon die Nase, da dies einem wichtigen Punkt von Blockchains, nämlich komplett anonym und offen beziehungsweise frei zugänglich für jeden zu sein, widerspricht. Daher werden die privaten Blockchains oftmals auch als Distributed Ledger bezeichnet: Im Grunde sind sie verteilt laufende Key-Value Stores, die mit einem Konsensprotokoll die Konsistenz des verteilten Systems bestimmen und gewährleisten.

Ein großer Vorteil dieser Art Blockchain ist, dass kein Proof-of-Work („Mining“) als Konsens gebraucht wird, um neue Blöcke zu validieren: Das Problem, dass ein bössartiger Teilnehmer anonym die Blockchain korrumpieren kann, existiert hier nicht, da jeder Teilnehmer eindeutig identifizierbar ist. Die Blockchains sind daher auch gut dazu geeignet, viele Transaktionen pro Sekunde zu generieren, da beim Konsens der arbeitsintensive Teil komplett wegfällt. So wird oftmals der Raft-Algorithmus als Grundlage beim Konsens verwendet [2].

Alle privaten Blockchain-Frameworks unterstützen auch die Ausführung von Smart Contracts: Das sind Anwendungen, welche in verteilter Manier in dem Netzwerk ausgeführt werden können. Dabei haben sie Zugriff auf den Distributed Ledger und können beispielsweise genutzt werden, um bestimmte Vorbe-

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**



DAAD Deutscher Akademischer Austauschdienst
German Academic Exchange Service

Danksagung

Das Dipper Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (Förderkennzeichen: 01DG21017) und vom Deutschen Akademischen Austauschdienst (ID: 57557211) gefördert. Wir danken den genannten Institutionen für die Bereitstellung der finanziellen Mittel.

dingungen vor einer Transaktion zu prüfen. Sollten diese nicht erfüllt worden sein, wird die Transaktion abgelehnt und der Status des Ledgers wird nicht verändert.

Das DIPPER Projekt

Das Dipper Projekt (Distributed IoT-Platforms for Safe Food Production – in Education, Research and Industrie) hat das Ziel Einsatzmöglichkeiten von Blockchains im industriellen Umfeld näher zu untersuchen: In welche Szenarien bzw. Anwendungsfällen kann der Einsatz einer Blockchain vorteilhaft sein? Welche technischen Lösungen sind dann zu empfehlen? Welche Technologien fehlen noch und müssen noch bereitgestellt werden. Das Projekt wird zusammen mit der Kwame Nkrumah University of Science and Technology (KNUST) in Kumasi, Ghana realisiert. Als Anwendungsfall in Ghana bieten sich Probleme in der Nahrungsherstellung an: Ein großes Problem in Ghana ist der Verkauf von Palmöl, welches mit Farbstoffen versetzt wurde, um eine kräftigere Farbe zu erhalten. Die dabei verwendeten Substanzen sind jedoch nicht immer gesundheitlich unbedenklich. Das Ganze hat sich inzwischen so weit entwickelt, dass Konsumenten das nicht so farblich kräftige Öl bevorzugen, was traditionell eher ein Zeichen für niedrige Qualität war. Eine Rückverfolgbarkeit (Traceability) über alle Zwischenhändler hinweg bis hin zum Hersteller oder Rohstofflieferanten würde diese Praktiken erschweren, da der Weg des Öls nachvollziehbar wäre. Für genau diesen Fall bietet sich ein Distributed Ledger an: Die einzelnen Akteure vertrauen sich nicht, allerdings gibt es schon eine gewisse Geschäftsbeziehung miteinander, sodass der Zugriff auf eine gemeinsame Blockchain genau diese Traceability, sogar für den Endkunden, falls gewünscht, gewährleisten kann.

Die Forschung stellt bei Dipper allerdings nur einen Teilaspekt des Projektes dar: Es wird an der KNUST auch ein neues IoT Labor von Grund auf eingerichtet. Zusätzlich wird Lehrmaterial (inkl. aufgezeichneter Vorlesungen) erstellt, das als Grundlage dient, den Studierenden eine neue, IoT fokussierte Vorlesung anzubieten.

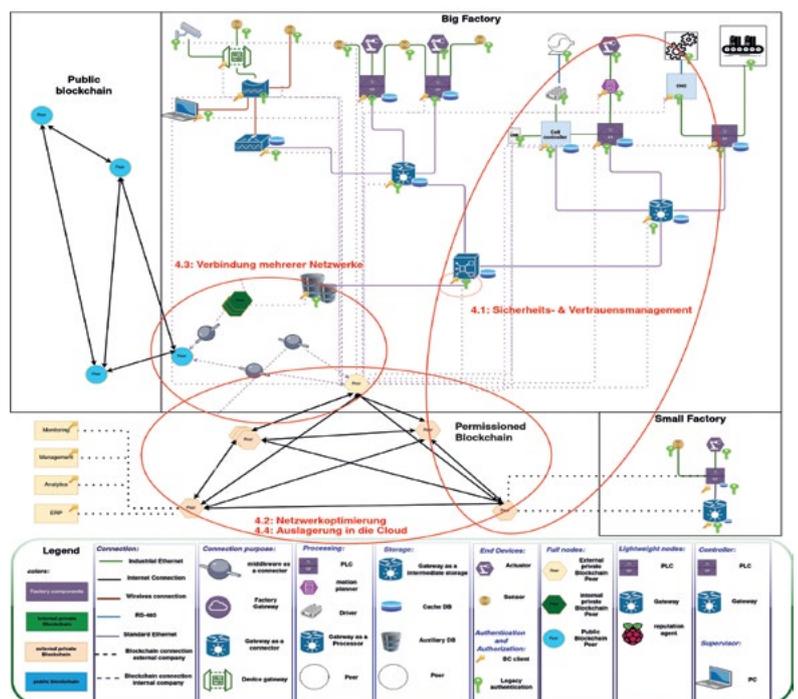
Architektur

Die Grundidee der Architektur (Abbildung 1) basiert auf der Annahme, dass es eine Reihe von Unternehmen gibt, die auf der gleichen oder auf unterschiedlichen Stufen der Wertschöpfungsketten zusammenarbeiten wollen,

da sie gemeinsame Interessen verfolgen. Auf Grundlage dieser gemeinsamen Interessen (beispielsweise Herstellen eines gemeinsamen Produkts) sind sie bereit, Ressourcen zu teilen, um die Zusammenarbeit reibungsloser und einfacher zu gestalten. Daher ist es nötig, gemeinsame Entscheidungen zu treffen, die die Zustimmung aller Teilnehmer benötigen. Da bei diesem Zusammenschluss Daten, Speicher- und Computerressourcen gemeinsam genutzt werden können, ist es auch möglich, dass kleinere Unternehmen und vor allem auch die Rohstofflieferanten an das Blockchain-Netzwerk angeschlossen werden können. In der Abbildung wäre das die „Small Factory“, welche unter Umständen nicht einmal industrielle und vernetzte Anlagen besitzt, sowie die Logistikunternehmen. Durch den simplen Client Anschluss an das private Blockchain-Netzwerk wird zwar ein gutes Stück Kontrolle über das Netzwerk aufgegeben und man ist von einem Dritten abhängig, um überhaupt Zugriff zu bekommen, allerdings kann das den initialen Aufwand für den Einstieg in das Netzwerk erheblich verringern.

Im Gegensatz dazu ist die „Big Factory“ (der obere Teil in der Abbildung) ein vollwertiges Mitglied im Blockchain-Netzwerk: So können hier einer oder mehrere Blockchain-Knoten betrieben werden, die Teil des fabrikübergreifenden privaten Netzwerks sind. Die Daten, welche in der Blockchain abgespeichert werden sollen, können aus den verschiedensten Quellen stammen. So kön-

Abb. 1: Vereinfachte Systemarchitektur des Dipper Projekts



nen beispielsweise Maschinen direkt angebunden werden. Je nach Typ und Alter der Maschine gibt es dazu mehrere Möglichkeiten. Modernere Maschinen haben meistens einen OPC UA Server in der SPS integriert, über welchen Daten abgefragt werden können. Auf den Gateways werden diese Daten dann durch einen Blockchain-Client in das Netzwerk geschrieben. Älteren Maschinen können mit günstigen Einplatinencomputern nachgerüstet werden. Da gerade industrielle Anlagen mitunter riesige Datenmengen produzieren können, gibt es mehrere Möglichkeiten, wo genau diese gespeichert werden: Sollten die Datenmengen zu groß für das firmenübergreifende private Netzwerk sein, wäre auch ein eigenes firmeninternes Netz vorstellbar (die grünen Knoten innerhalb der „Big Factory“). Weiter sollen große Datenmengen auch außerhalb der Blockchain speicherbar sein („Auxiliary DB“), wobei die Daten dabei natürlich signiert werden und die Signatur dann fälschungssicher in der Blockchain steht.

Auch die Möglichkeit, bestimmte Daten in eine externe, öffentliche Blockchain zu schreiben, ist gegeben. Dies kann sinnvoll sein, wenn Endkunden beispielsweise einen Nachweis über die Herkunft des Produkts fordern. Ein typischer Anwendungsfall im Bereich der Lebensmittelproduktion wäre, dass der Kunde genau sieht, woher das Produkt stammt, wo es verpackt wurde und wie lange es transportiert wurde. Diese Transparenz (und Unveränderlichkeit) der Daten soll das Vertrauen untereinander stärken und somit auch die Zusammenarbeit verbessern.

Themenfelder

Anhand der beschriebenen Architektur gibt es zurzeit vier große Forschungsfragen, denen nachgegangen wird. Diese behandeln Themen, bei denen die genaue Lösung noch nicht klar ist. Jedes Thema wird dabei als Doktorarbeit (drei davon in Ghana, eine an der Hochschule) vertieft. Wo die Themen innerhalb der Architektur einzuordnen sind, ist in Abbildung 1 eingezeichnet.

Sicherheits- / Vertrauensmanagement

Die Kommunikation innerhalb der Architektur lässt sich in drei Hauptteile unterteilen: innerhalb einer Fabrik, zwischen den Fabriken (über die private Blockchain) und außerhalb der Fabrik (öffentliche Blockchain). Auf jeder

Ebene müssen die Daten entsprechend verteilt und gesammelt werden. Um die Sicherheit des Firmennetzwerkes zu garantieren, soll ein Trust-Management-System entwickelt werden, das die Authentifizierung und Autorisierung der einzelnen (industriellen) Endgeräte verwaltet. Das System soll dabei verteilt auf der privaten Blockchain laufen, sodass das Trust-Management nicht auf eine Firma beschränkt ist. In der Industrie hat man zusätzlich das Problem, dass es schon existierende Systeme gibt, welche teilweise eine eigene Authentifizierung durchführen (bspw. mittels kryptografischer Zertifikate). Diese „Legacy“-Systeme müssen natürlich in das neue System eingebunden werden, was aufgrund der Vielzahl an Systemen eine Herausforderung darstellt.

Netzwerkoptimierung des Blockchain-Netzwerkes

Die Architekturabbildung zeigt das private/permissioned Netzwerk mit soliden, ethernet-basierten Verbindungen. Dies entspricht in Ghana allerdings nicht immer der Realität: So ist es durchaus möglich, dass Firmen gar keinen festen Internetanschluss haben und nur über mobiles Internet verfügen. Um zu verstehen, wie ein Blockchain-Netzwerk auf Veränderungen bzw. Probleme der darunterliegenden Infrastruktur reagiert, ist es notwendig, das Verhalten des Netzwerkes während seiner normalen Operation vorherzusagen zu können: Wie wirkt es sich aus, wenn eine Transaktion getriggert wird? Was passiert genau, wenn ein neuer Knoten erstmalig hinzukommt? Um diese Fragen zu beantworten, muss der Netzwerkverkehr analysiert werden. Sobald man eine genaue Vorstellung davon hat, lässt sich das Blockchain-Netzwerk im Betrieb umkonfigurieren, um auf die neue Situation reagieren zu können. So kann man bei einem privaten Netzwerk beispielsweise die Konsensrichtlinien anpassen, was dazu führen kann, dass bestimmte Verbindungen zwischen den Knoten nicht mehr so stark beansprucht werden.

Verbindung mehrerer Blockchain-Netzwerke

Wie man in der Architektur sehen kann, ist die Verknüpfung mehrerer unabhängiger Blockchain-Netzwerke bisher noch ein Single Point of Failure. Um dieses Problem zu lösen, wird untersucht, inwieweit man den Datentransfer zwischen den Blockchains parallelisieren kann. Das einfachste Verfahren, dass man

einen „Adapter“ benutzt, wäre ein Stück Software, das Zugriff auf die verschiedenen Blockchain-Clients hat und manuell die Daten transferiert. Aus Blockchain-Sicht unterscheidet sich der Adapter nicht von einem beliebigen anderen Client und ist somit an die gleichen Regeln (und Performance) wie alle anderen gebunden. Die Ausweitung des „Adapter“ Gedankens hin zu einem Peer to peer basierten Ansatz, der auf mehrere Blockchain-Knoten zugreifen kann, ist eine Lösungsmöglichkeit. Der Wunsch geht allerdings so weit, dass im Endeffekt die Einschränkung, ein normaler Client zu sein, aufgehoben werden soll: Wenn Blöcke direkt verschoben beziehungsweise kopiert werden könnten, ohne sie erneut zu verifizieren, wäre der Performancevorteil nicht zu vernachlässigen. Dazu müssen die Blöcke allerdings manuell umgeschrieben werden, was nicht ohne Weiteres machbar ist.

Auslagerung von Blockchain-Daten in die Cloud

Die Auslagerung bestimmter Daten aus der Blockchain in einen Cloudspeicher spielt im industriellen Umfeld eine Rolle, da oftmals Geräte verwendet werden, bei denen die Ressourcen sehr knapp bemessen sind. In erster Linie wird dabei versucht, ganze Blöcke aus dem lokalen Speicher auszulagern. Dabei ist wichtig, dass oft genutzte Ressourcen nicht ausgelagert und die lokalen Speicher- und Ressourcenbeschränkungen berücksichtigt werden. Dieses Optimierungsproblem soll durch Maschinelles Lernen gelöst werden. Dazu muss das Netzwerk so modelliert werden, dass eine Optimierung auf verschiedene Parameter möglich ist. Nur dann kann der ML-Algorithmus einen Geschwindigkeitsvorteil in Vergleich mit bisherigen Verfahren erzielen. Für die praktische Implementierung des Systems soll weiterhin Transparenz aus Sicht der Blockchain ganz oben stehen. Das heißt, für das Netzwerk soll es keinen Unterschied machen, ob ein Block lokal vorhanden ist oder nicht. Dabei wird untersucht, ob und wie dies möglich ist, ohne die Blockchain anzupassen beziehungsweise die Anpassung am Blockchain-Framework selbst möglichst gering zu halten.

Fazit

Allgemein lässt sich beim Thema Blockchain in der Industrie sagen, dass es weit weniger verbreitet und erforscht ist als die Themen rund Kryptowährungen und öffentliche Blockchain. Es gibt zwar einige theoretische Ansätze zu aktuellen Forschungsfragen zu Distributed Ledgers, allerdings meistens nicht mit Hinblick auf das industrielle Umfeld. Im Dipper-Projekt werden diese Fragen gestellt und beantwortet. Darüber hinaus wird ein funktionsfähiger Demonstrator erstellt, welcher existierende Blockchain-Frameworks benutzt und das Ganze so verknüpft, dass es schlussendlich den Grundstein für eine fortschreitende Industrialisierung im Nahrungssektor in Ghana, aber auch im Schwarzwald, legen kann. Dazu sollen lokale industrielle Partner des KNUST erstmalig eng in ein Projekt dieser Art eingebunden werden.

AUTOREN



Dominik Welte M.Sc.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter ivESK
dominik.welte@hs-offenburg.de



Fatemeh Ghovanlooy Ghajar, M.Sc. M.S.
Wissenschaftliche Mitarbeiterin ivESK
fatemeh.ghovanlooy@hs-offenburg.de



Prof. Dr.-Ing. Axel Sikora
Wissenschaftl. Ltg. ivESK,
Lehrgebiete: Kommunikationsnetze, Bussysteme u. Schnittstellen, eingebettete u. industrielle Netzwerke
axel.sikora@hs-offenburg.de

Referenzen/References:

- [1] Nakamoto, Satoshi. „Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system.“ Cryptography Mailing list at <https://metzdowd.com> (2008)
- [2] Ongaro, Diego, and John Ousterhout. „In search of an understandable consensus algorithm (extended version).“ (2013)

LPWAN-Funktechnologien im 2,4GHz-Band

Dipl.-Inform. (FH) Manuel Schappacher, Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Axel Sikora

In den letzten Jahren haben sich Low Power Wide Area Networks (LPWAN) als Schlüsseltechnologien für die Konnektivität vieler Anwendungen im Internet der Dinge (IoT) herauskristallisiert. Diese kombinieren in der Regel sehr niedrige Datenraten mit extremen Kosten- und Energiebeschränkungen. Vor allem LoRa/LoRaWAN genießt aufgrund seiner guten Leistung und seiner offenen Community eine hohe Sichtbarkeit auf den heutigen Märkten. Ursprünglich wurde LoRa für den Betrieb in den lizenzfreien Sub-GHz-ISM-Bändern bei 868 MHz entwickelt. Nun wurde jedoch eine LoRa-basierte Lösung im 2,4 GHz-ISM-Band vorgestellt, die höhere Bandbreiten und höhere Datenraten verspricht. Darüber hinaus unterliegt sie nicht den durch in den Sub-GHz-ISM-Bändern geltenden Duty-Cycle Beschränkungen und öffnet damit auch die Türen zu vielen neuen Anwendungsfeldern. Aufgrund höherer Bandbreiten und kürzerer Übertragungszeiten wird auch der Einsatz alternativer MAC-Schichtprotokolle sehr interessant, zum Beispiel für TDMA-basierte Ansätze, die wiederum um weitere gängige Protokollschichten auf Netzwerk und Anwendungsebene erweitert werden können.

Dieser Artikel zeigt in einer Kurzfassung des bereits veröffentlichten IEEE Papers [1] die Ergebnisse des Projekts LongRange24, das das ivESK zusammen mit dem Unternehmen IMST GmbH aus Kamp-Lintfort bearbeitet.

For the past few years Low Power Wide Area Networks (LPWAN) have emerged as key technologies for the connectivity of many applications in the Internet of Things (IoT) combining low-data rates with strict cost and energy restrictions. Especially LoRa/LoRaWAN enjoys a high visibility on today's markets, because of its good performance and its open community. Originally LoRa was designed for operation within the Sub-GHz ISM bands for Industrial, Scientific and Medical applications. However, at the end of 2018, a LoRa-based solution in the 2.4GHz ISM-band was presented, promising higher bandwidths and higher data rates. Furthermore, it overcomes the limited duty-cycle prescribed by the regulations in the ISM-bands and therefore also opens doors to many novel application fields. Also, due to higher bandwidths and shorter transmission times, the use of alternative MAC layer protocols becomes very interesting, i.e. for TDMA based-approaches that allow the usage of further network and application protocols.

This article shows the work of the LongRange24 project in an abridged version of the already published IEEE paper [1].

Einführung

In den letzten Jahren hat sich eine völlig neue Kategorie drahtloser Netze herausgebildet, die so genannten LPWAN-Netze (Low Power Wide Area Networks). Sie erreichen unter realen Bedingungen Entfernungen von mehreren Kilometern, während die Sendeleistung nur im Milliwatt-Bereich liegt. Möglich wird dies durch extreme Empfängerempfindlichkeiten, die im Wesentlichen durch schmalbandige Übertragung, innovative Codierungsverfahren oder niedrige Nettodatenraten unter Verwendung modernster Halbleitertechnologien er-

reicht werden. Der Hauptanwendungsbereich solcher Netze ist die Verbindung einfacher Geräte mit einer räumlichen Verteilung. Eines der bekanntesten Protokolle der vergangenen Jahre ist LoRa/LoRaWAN. (LoRa wird für die Codierungs- und Modulationsverfahren der physikalischen Schicht [Layer 1] verwendet. LoRaWAN wird für das standardisierte Kanalzugriffsverfahren und die entsprechende Systemarchitektur auf der Verbindungsschicht [Layer 2] unter Verwendung der LoRa-Technologie auf Layer 1 verwendet.)

LoRa/LoRaWAN wurde ursprünglich für den Betrieb in den Sub-GHz-ISM-Frequenzbändern konzipiert, was auch hervorragende Reichweiteigenschaften verspricht. Der schmalbandige Ansatz schränkt jedoch die Kanalkapazität ein und erlaubt nur „einfache“ Anwendungen mit geringen Datenmengen. Außerdem können in realen Anwendungen lange Übertragungszeiten auftreten, die zu einem hohen Energieverbrauch führen. Ein weiterer Nachteil des Frequenzbands besteht darin, dass dieses nicht weltweit harmonisiert sind. So ist das auch in Deutschland genutzte 868-MHz-Band im Wesentlichen nur im europäischen Regelungsbereich des ETSI verfügbar, nordamerikanische und asiatischen Märkte unterliegen anderen Regulierungen. Geräte für den weltweiten Einsatz sind technisch möglich, bedingen aber erhöhten technischen Aufwand und zusätzliche Kosten, da mindestens eine Lokalisierungsfunktion unterstützt werden muss.

In dem ZIM-Projekt „Flexible, erweiterbare und offene LoRa-Technologien im 2,4 GHz-ISM-Band (LongRange24)“ werden diese Einschränkungen in einem kooperativen Forschungsprojekt durch einen neuen Ansatz dem sogenannten „LongeRange24“-Netzwerk umgangen, indem eine neuartige LoRa-basierte Technologie genutzt wird, die im 2.4GHz Band arbeitet. Ziel des Projekts ist der Aufbau eines 2.4GHz LoRa/LoraWAN-Netzwerks, das sich auf den höheren Schichten nahtlos in existierende LoRaWAN-Systeme integrieren lässt und Anwendungen mit höherer Datenrate ermöglicht. Zudem wird gezeigt, wie die 2,4 GHz LoRa-Lösung mit dem IEEE802.15.4-2015 TSCH-Modus kombiniert werden kann, um einfache, vermaschte und deterministische Netzwerke mit großen Zellradien aufzubauen. Letztendlich werden beide Netzwerke integriert und über eine gemeinsame Anwendung verbunden.

Dieser Beitrag gibt einen kurzen Einblick in den Stand der Technik und beschreibt den Aufbau der verschiedenen Netzwerke sowie die internen Architekturen der einzelnen Komponenten. Schließlich werden einige Ergebnisse der ersten Leistungsmessungen unseres Systems mit Entwicklungshardware gezeigt werden.

LoRa/LoRaWAN im Sub-GHz und 2.4GHz-Band

Im Allgemeinen nutzt LoRa/LoraWAN lizenzfreie Frequenzen (die sogenannten ISM-Bänder für industrielle, wissenschaftliche und medizinische Anwendungen) im Sub-GHz-MHz-Band, was mit erheblichen Einschränkungen ver-

bunden ist. Es handelt sich um ein lizenzfreies Band, das in Europa unter den europäischen Regelungsbereich von ETSI fällt, wo eine Funknetzplanung im Allgemeinen nicht möglich ist. Die Frage der Koexistenz stellt daher eine grundlegende Herausforderung dar, welches durch eine Begrenzung des maximal erlaubten Duty-Cycles beispielsweise auf 0,1 Prozent, 1 Prozent oder 10 Prozent entschärft wird. Dies schränkt allerdings die praktische Einsetzbarkeit dieser Technologien erheblich ein.

Anders sieht es im 2,4 GHz-Band aus. In diesem (auch lizenzfreien) Band existiert keine Duty-Cycle Beschränkung, was es ermöglicht, auch Technologien mit höheren Datenraten zu nutzen. Bekannte Vertreter sind hier Bluetooth oder WLAN. Ende 2018 stellte Semtech eine LoRa-basierte Lösung vor, die ebenfalls im 2,4 GHz-ISM-Band arbeitet und demnach auch höheren Bandbreiten und Datenraten als das klassische LoRa bietet, welches ein Spielfeld für völlig neue und innovative Anwendungen ermöglicht.

Darüber hinaus wird die Kombination von LoRa als Protokoll der physikalischen Schicht mit anderen Protokollen der MAC- und Netzwerkschicht denkbar. Insbesondere die Nutzung des TSCH-Protokolls (Time Slotted Channel Hopping) aus dem bekannten IEEE 802.15.4-2015-Standard [2][1] in Kombination mit 6LoWPAN [3] und IPv6 [4] weist ein enormes Potential auf. Das TSCH-Protokoll (Time Slotted Channel Hopping) ist ein spezieller Modus des IEEE802.15.4-2015-Standards, der Anfang 2016 veröffentlicht wurde. Neben anderen neuen MAC-Betriebsarten führt er das Time Slotted Channel Hopping (TSCH)-Protokoll ein, welches in die Kategorie der Time Division Multiple Access (TDMA) Protokolle fällt und die Kommunikation in fest definierte Zeitschlitze einteilt. Es wurde für industrielle drahtlose Netzwerkanwendungen mit geringem Stromverbrauch entwickelt, die sowohl hohe Zuverlässigkeit als auch hohe Energieeffizienz erfordern. Hierfür nutzt TSCH ein pseudozufälliges Kanalsprungmuster, um schmalbandige Interferenzen zu bekämpfen [5].

Bisherige Arbeiten

Verschiedene Forschungs- und Entwicklungsarbeiten beschäftigten sich bereits mit LoRa/LoRaWAN im Sub-GHz- sowie im 2,4 GHz-Band. Auch wurden verschiedene Ansätze zur Integration der physischen Schicht von LoRa in Time Slotted Channel Hopping-Protokolle gemacht und analysiert.

In [6] stellen die Autoren ihren Ansatz vor, ein LoRa-over-TSCH-Netzwerk zu betreiben, indem LoRa in den TSCH/6TiSCH Stack von Contiki-NG [7] integriert wird. Diese Arbeit basiert auf dem Sub-GHz-Band und verwendet ein SX1272 LoRa-Funkgerät. Darüber hinaus wurde ein Multi-Hop-Netzwerk auf der Grundlage des Orchestra-Schedulers eingerichtet, der eine autonome Planung zwischen den Knoten unter Verwendung von RPL-Routing-Informationen ermöglicht. Die Arbeit zeigt gute Ergebnisse in Bezug auf die Widerstandsfähigkeit von TSCH-over-LoRa gegenüber Interferenzen, wenn Kanalsprünge aktiviert sind, und im Vergleich zu einem Einkanal-Netzwerk. Allerdings zeigt diese Arbeit auch, dass die erforderlichen Timing-Parameter recht umfangreich sind. So wurde etwa in SF7 eine Slotlänge von 278 ms und in SF10 eine Länge von 4500 ms verwendet, was zu sehr hohen Latenzen führt.

Aus der Entwicklungsperspektive stehen mehrere Komponenten bereits zur Verfügung, die für unsere Arbeit relevant sind und dementsprechend auch genutzt werden. [1] bietet einen LoRaWAN-Kommunikationsstack für Endknoten, der alle Geräteklassen unterstützt, die durch den LoRaWAN-Standard [8] definiert sind. Darüber hinaus bietet er ein gutes Abstraktionsniveau in mehreren Richtungen. Zum Beispiel hat es eine klare Trennung zwischen der Protokolllogik und der Hardware-Implementierung, was die Integration neuer Mikrocontroller, Transceiver oder Plattformen erleichtert. Darüber hinaus hält es die Kanal- und Protokollparameter (in LoRaWAN werden sie Regionalparameter genannt) getrennt. Dies ermöglicht die Definition neuer Parameter, was für die Einführung des 2,4-GHz-Bands zwingend erforderlich ist.

Für das Back-End gibt es ebenfalls mehrere Lösungen. Beispielsweise stellt [1] eine Open-Source-Lösung bereit und bietet einen kompletten Satz von Softwarekomponenten für den Betrieb eines vollständigen LoRaWAN-Backends, einschließlich des Netzwerkserver, des Anwendungsservers und einer Brücke zur Verbindung von Gateways.

Contiki-NG [7] ist eine Open-Source-Implementierung des 6LoWPAN/6TiSCH-Stacks. Es enthält Implementierungen verschiedener IoT-Protokolle wie TSCH, 6LoWPAN, IPv6, RPL und viele Anwendungsschichtprotokolle.

Netzwerk Design

Das Netzwerkdesign der LongRange24-Entwicklung verfolgt zwei Hauptziele. Zum einen soll es die Fähigkeit bieten, sich nahtlos in bestehende Netzstrukturen zu integrieren. Dies soll einen einfachen Austausch der unteren Netzwerkkomponenten, nämlich der Geräte und der Gateways, ermöglichen, während die Teile des übergeordneten Netzwerks wie das Management oder die Anwendung selbst erhalten bleiben können. Eine weitere große Herausforderung ist die Flexibilität in Bezug auf den Kompromiss, der zwischen den Schlüsselkomponenten - hohe Reichweite, hohe Datenrate und hohe Zuverlässigkeit - geschlossen werden kann. Daher werden LoRaWAN- und LoRaTSCH-Netzwerke in einem einzigen Netzwerkaufbau kombiniert.

LoRaWAN Subnetz

Die LoRaWAN-Architektur wird als „Stern der Sterne“ betrachtet, wobei es sich um eine Struktur handelt, die das Kommunikationsprotokoll und die Netzwerksystemarchitektur definiert, während die physikalische Schicht, LoRa, die Langstreckenverbindung ermöglicht [9]. Endgeräte und Gateways nutzen die LoRa-Technologie, um miteinander zu kommunizieren, während die Verbindung zum Backhaul, zum Beispiel dem Netzwerkserver, Join-Server und Anwendungsserver, über IP-basierte Protokolle erfolgt. In unserem Netzwerk ersetzen wir einige der Netzwerkkomponenten, nämlich das Gateway und die Geräte, während die Back-End-Komponenten wie der Netzwerkserver und der Anwendungsserver gleich bleiben. Die neuen Geräte und Gateways arbeiten im 2,4 GHz-Band, verwenden aber weiterhin das reguläre LoRaWAN-Protokoll. Dies ermöglicht eine nahtlose Integration des 2,4 GHz-LoRa-Netzes, da die Abstraktion des Bandes unterhalb des Netzwerkserver erfolgt.

Dennoch sind auf dem Netzwerkserver Konfigurationen erforderlich, da er die Kanalparameter des Gateways und seiner Geräte kennen muss. Dies erfordert die Definition und Integration eines neuen regionalen Parametersatzes für das 2,4-GHz-Band, welche Definitionen für den Standardkanal und die verfügbaren Kanäle, die Codierung der Datenrate, die Codierung der Ausgangsleistung, die maximalen Nutzdatengrößen in Abhängigkeit von der Datenrate, die Downstream-Datenraten, die entsprechende Upstream-Datenrate und den Datenraten-Offset.

TSCH Subnetz

Ein TSCH-Netz besteht in der Regel aus einem Koordinator und mehreren Geräten. Der Koordinator dient als Zeitquelle für andere Geräte und ist dafür verantwortlich, die Gesamtstruktur des TSCH-basierten Kanalzugangs durch sogenannte Slot Frames zu beschreiben. Ein Slot-Frame beschreibt ein sich wiederholendes Fenster, das aus einer genau definierten Anzahl von Slots besteht, wobei alle Slots die gleiche Dauer haben. Wie auf diese Zeitschlitze zugegriffen wird, wird durch einen Zeitplan festgelegt. Dieser Zeitplan und die Art und Weise, wie er erstellt wird, ist nicht Teil der Norm und liegt in der Verantwortung des Anwenders oder Entwicklers.

TSCH selbst, wie es in der Norm beschrieben ist, gibt keine bestimmte Netztopologie vor, sondern überlässt diese Wahl und auch die Implementierung dem Benutzer. Durch die Verwendung von 6TiSCH als TSCH-basiertes Protokoll werden Multi-Hop-Topologien durch den Einsatz des RPL-Routing-Protokolls möglich. Wir haben uns jedoch entschieden, keine Multi-Hop-Umgebung zu verwenden, sondern die Netzwerkarchitektur so einfach wie möglich in einer Sterntopologie zu halten. Während ein Multi-Hop-TSCH-Aufbau komplexe Planungsalgorithmen erfordert, ermöglicht eine Sterntopologie einen einfachen und schnellen Aufbau des Netzes. Darüber hinaus hat der Benutzer die volle Kontrolle über den Zeitplan und kann daher etwa bestimmten Geräten leicht Vorrang einräumen. Ein weiterer Grund für den Verzicht auf ein Multi-Hop-Netzwerk ist die hohe Kommunikationsreichweite der 2,4-GHz-LoRa-Physikschicht, die eine logische Erweiterung der Kommunikationsreichweite über Hops für die meisten Anwendungsfälle unnötig macht. Dennoch werden IPv6 und 6LoWPAN zur Datenübertragung und zur nahtlosen Integration in ein bestehendes IP-Netz verwendet.

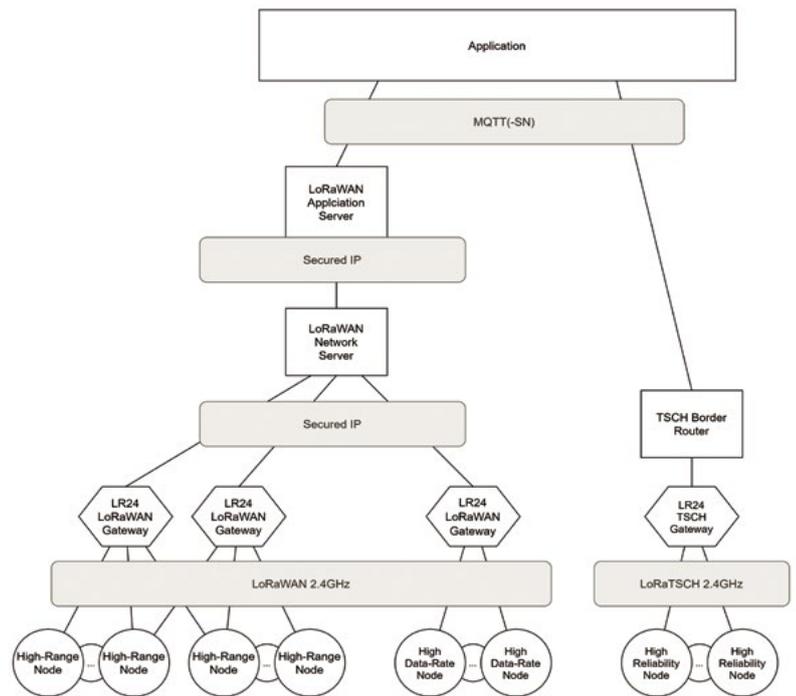
LongRange24 Netz

Wie beschrieben, kombiniert unser Netz zwei bestehende Technologien, LoRaWAN TSCH. Abbildung 1 zeigt die vereinfachte Architektur des LongeRange24-Netzwerks. Innerhalb des LoRaWAN-Netzes können verschiedene Netzkonfigurationen verwendet werden. Beispielsweise High-Range oder High-Data-Rate Konfigurationen. Welcher Typ verwendet werden soll, kann mit dem entsprechenden regionalen Parametersatz festgelegt werden. Im Back-End wird ein regulärer LoRaWAN-Aufbau verwendet. Ein Netzwerkservers ist für den Zugriff auf die Geräte zuständig, während der

Anwendungsserver die ein- und ausgehenden Daten verarbeitet.

Die TSCH-Konfiguration stellt die hochzuverlässige Konfiguration des LongRange24-Netzes dar. Die Geräte verbinden sich mit dem LR24 TSCH-Gateway, das mit einem sogenannten Border-Router verbunden ist. Ein Border-Router ist dafür verantwortlich, die Verbindung zwischen dem TSCH und dem regulären IP-Netzwerk herzustellen. Dadurch können die Geräte direkt mit der Anwendung und umgekehrt über ein Anwendungsprotokoll kommunizieren, ohne dass eine zusätzliche Übersetzung zwischen verschiedenen Protokollfamilien erforderlich ist.

Abb. 1:
Architektur des Long Range24-Netzwerks



Umsetzung und Test

Das Projekt umfasst die Entwicklung der Hardware- Softwarebestandteile, sowohl der Endgeräte als auch der Gateways (Abbildung 2). Die Hardwarebestandteile sowie die zugehörigen Treiber werden hierbei von unserem Projektpartner, der IMST GmbH entwickelt. Das ivESK ist hauptverantwortlich für die Entwicklung und Integration der Protokollstapel.

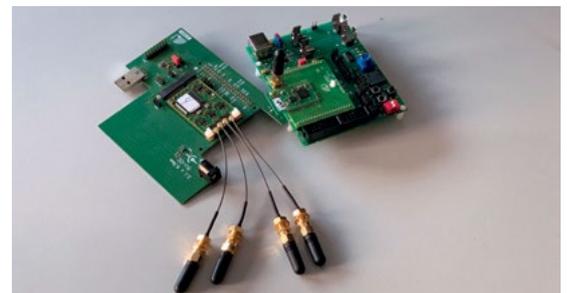


Abb. 2:
LongRange24-Entwicklungsboards: Gateway/ Hub (li), Device (re)

Um letztendlich die Leistung des Systems zu bewerten, wurden mehrere Tests durchgeführt, von denen einer die mögliche Kommunikationsreichweite des Systems in einem Innenraumszenario zeigt. Dabei wurden die Reichweiten in einem Realaufbau im Steinbeis-Gebäude (Abbildung 3) mit verschiedenen Kommunikationsparametern analysiert, indem die Paketerfolgsraten (Abbildung 4) zusammen mit der gemessenen Signalstärke und dem Signal-Rausch-Abstand gemessen wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass das System im Hinblick auf die Kommunikationsreichweite deutlich unter dem Betrieb im 2,4 GHz-Bereich leidet. Dennoch ist es mit einer gut strukturierten Platzierung der Gateways möglich, ein Gebäude mit dieser Technologie auszustatten.

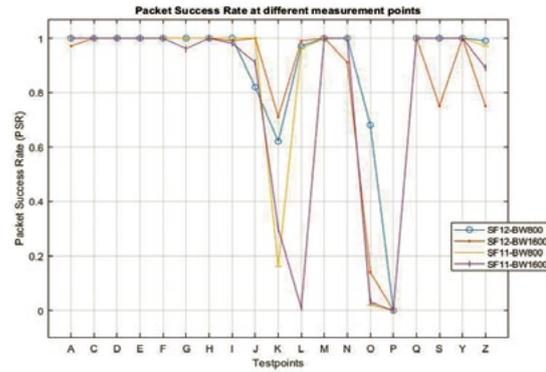
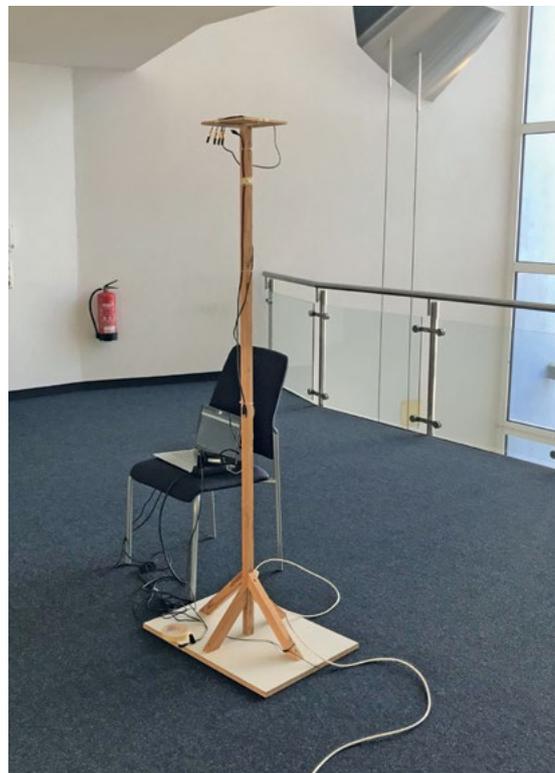


Abb. 4: Paketerfolgsrate an den unterschiedlichen Messpositionen

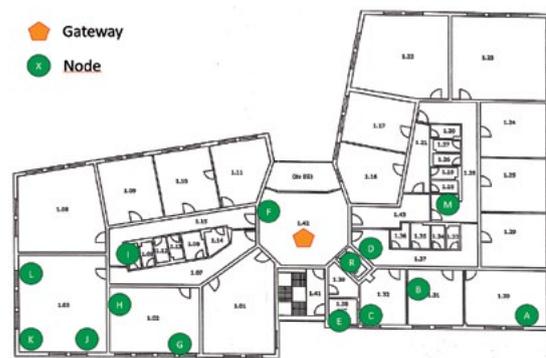


Abb. 3: Aufbau der Reichweitenmessungen und Lageplan

Referenzen/References:

[1] M. Schappacher, A. Dant and A. Sikora, „Implementation and Validation of LoRa-Based Systems in the 2.4 GHz Band,“ 2021 IEEE 4th Internat. Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), 2021, pp. 106-111, doi: 10.1109/AICT52120.2021.9628942C. Society, IEEE Std 802.15.4™-2015, IEEE Computer Society, New York, USA, 2015

[2] C. Society, IEEE Std 802.15.4™-2015, IEEE Computer Society, New York, USA, 2015

[3] G. Montenegro, N. Kushalnagar, J. Hui, D. Culler, RFC4944 - Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks, September 2007, <https://datacenter.ieft.org/doc/html/rfc4944>, accessed: 2022-02-11

[4] S. Deering, R. Hinden, RFC2460 - Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification, December 1998, <https://datacenter.ieft.org/doc/html/rfc2460>, accessed: 2022-02-11

[5] R. Piyare, G. Oikonomou, and A. Elsts, “Tsch for long range low datarate applications,“ IEEE Access, December 2020

[6] M. Haubro, C. Orfanidis, G. Oikonomou, and X. Fafoutis, “Tsch-over-lora: long range and reliable ipv6 multi-hopnetworks for the internet ofthings”, Internet Technol. Lett, vol. 3, p. e 165, August 2020

[7] “Contiki-ng: The os for next generation iot devices, <https://github.com/contiki-ng/contiki-ng>, accessed: 2021-05-06

[8] “Lorawan end-device stack implementation and example projects, <https://github.com/Lora-net/LoRaMac-node>, accessed: 2021-05-06

[9] J. de Carvalho Silva, J. J. P. C. Rodrigues, A. M. Alberti, P. Solic, and A. L. L. Aquino, “Lorawan - a low power wan protocol for internet of things: a review and opportunities,“ 2017 2nd Internat. Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech), July 2017



Danksagung

Diese Arbeit ist Teil des ZIM Projekts „Flexible, erweiterbare und offene LoRa-Technologien im 2,4-GHz-ISM-Band (LongRange24)“. Das ZIM-Vorhaben KF ZF4253609MS9 wurde im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Wir danken den genannten Institutionen für die Bereitstellung der finanziellen Mittel.

AUTOREN



Dipl.-Inform. (FH) Manuel Schappacher
Akademischer Mitarbeiter, Institut ivESK
manuel.schappacher@hs-offenburg.de



Prof. Dr.-Ing. Axel Sikora
Wissenschaftl. Leiter ivESK, Lehrgebiete:
Kommunikationsnetze, Bussysteme und
Schnittstellen, eingebettete u. industrielle
Netzwerke
axel.sikora@hs-offenburg.de