

# Erweiterung der Ausbildungsinhalte im Kontext des Wireless Network and Computer/Communications Lab im FG IoT Engineering

## Fachgebiet Entwicklung von Systemen für das Internet-of-Things

### Prof. (Jun.-Prof.) Dr. Florian Klingler

Dieser Antrag auf Förderung des Wireless Network and Computer/Communications Lab (WNC Labs) am Fachgebiet IoT Engineering (Entwicklung von Systemen für das Internet of Things) ergänzt die bereits im Jahr 2023 über den Förderverein IA beantragten Mittel für die Lehre. Insbesondere betrachten wir in diesem Antrag den Aufbau und die Erweiterung unseres LoRa Netzwerks, um dieses in der Lehre und der Ausbildung von Studierenden einzusetzen.

#### **Motivation und aktueller Stand:**

Das Wireless Network and Computer/Communications Lab (WNC Labs) am Fachgebiet IoT Engineering befasst sich mit effizienter Kommunikation von drahtlosen Netzwerken im Kontext von IoT sowie anderen Anwendungsdomänen, z.B. Fahrzeugnetze, Drohnen- und LEO-Satelliten-Kommunikation. In der Vergangenheit konnten in diesem Bereich zahlreiche wichtige Themenbereiche bearbeitet werden, z.B.:

- Kopplung von Funkkanälen zwischen Simulation und realer Welt in einer Hardware-in-the-Loop (HiL)-Umgebung.
- Prototypische Implementierung einer IEEE 802.11 WLAN-Toolbox zur Leistungsbeurteilung von Drahtlosnetzwerken im Bereich 2.4 und 5 GHz sowie IEEE 802.11ad 60 GHz.
- Jamming-Attacken auf IEEE 802.11 Unicast-Frames zum selektiven und gezielten Triggern des Exponential Backoff Algorithmus auf entfernten Knoten
- Evaluation der Performance von IEEE 802.11p im Bereich landwirtschaftlicher Umgebungen
- LoRa- und LoRaWAN-basierte Simulationsstudie zur effizienten Netzwerkprotokollentwicklung eines verteilten Waldbranderkennungssystems
- Prototypische Implementierung und experimentelle Evaluierung des verteilten Waldbranderkennungssystems
- Entwicklung eines verteilten Krisenkommunikationssystems basierend auf Raspberry Pi, LoRa und LoRaWAN sowie IEEE 802.11 WLAN.

Durch die finanzielle Unterstützung des Fördervereins konnten im vergangenen Jahr 2023 großartige Erfolge verzeichnet werden, welche einen erheblichen Beitrag zur Sichtbarkeit der Lehre im Kontext von Drahtlosnetzwerken im FG IoT Engineering geleistet haben.

Im Detail war es mit Hilfe der beschafften Hardware durch den Förderverein (Antrag 2023) möglich, dass entwickelte **LoRa-basierte Krisenkommunikationssystem** entsprechend zu skalieren und die Arbeit an einer **internationalen Konferenz (IEEE LCN 2023) in Florida, USA**, vorzustellen. Weiters freut es uns, dass wir für diese Arbeit auch den **Best Demo Award** erhalten haben.



[1] Alisa Stiballe, Simon Welzel, Johannes Dorfschmidt, Darwin Schlüter, Dominik Delgado Steuter, Jannik Hense and Florian Klingler, "Demo: Chat Based Emergency Service via Long Range Wireless Communication (LoRa)," Proceedings of 48th IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN 2023), Florida, US, October 2023.

Es hat sich gezeigt, dass dieses Thema zum einen ein sehr großes Potential für darauf aufbauende Arbeiten im Bereich Lehre und Forschung aufweist, jedoch auch national und vor Allem international entsprechend Beachtung findet und Sichtbarkeit erzeugt. Insbesondere sind durch diese Arbeit bislang schon mehrere Studierende an ausländischen Universitäten auf uns aufmerksam geworden, welche sich dann für ein Erasmus+ Internship bei uns am Fachgebiet beworben haben.

Parallel zu diesen Arbeiten an LoRa Netzwerken bieten wir im FG IoT Engineering auch **practicing** Angebote an, bei welchen Studierende eine Experimentierumgebung für Eingebettete Systeme entwerfen. Im Detail steht hierbei die Entwicklung eines Network Boot Servers im Zentrum, mittels welchem die beschafften Systeme aus dem VFFIA Antrag 2023 (PC Engines APU) flexibel via Remote Management gewartet und verwaltet werden können.

## Ziele:

Die praktische Anwendung von LoRa-basierten Kommunikationssystemen sieht die Verwendung von Gateways vor, um die Reichweite des Netzwerks zu erhöhen. Im Detail, kann mittels LoRa Gateways eine Verbindung zwischen einem drahtgebundenen Netzwerk und dem Funknetzwerk hergestellt werden, um somit Informationen an die gewünschten geographischen Bereiche weiterzuleiten – ähnlichen der Idee von Mobilfunknetzen.

Mittlerweile gibt es ein weit verbreitetes und öffentlich nutzbares LoRa basiertes IoT Netzwerk – The Things Network – welches es erlaubt, die durch andere Personen/Institutionen für die Öffentlichkeit zur Verfügung gestellten und installierten LoRa Gateways zu verwenden und darüber Informationen zu empfangen und versenden.

Obwohl dieses System sehr verbreitet ist und zahlreiche Vorteile bietet, gibt es im Bereich Forschung und Lehre erhebliche Nachteile dieses Systems [2]. Im Detail greift hier eine FairUse Policy, welche die Anzahl an versendbaren Nachrichten erheblich limitiert (aktuell 10 Nachrichten pro Tag).

[2] <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle/#fair-use-policy>

Die Zentrale Idee dieses Antrags ist es, ein eigenes die TU Ilmenau umspannendes LoRa Netzwerk zu installieren, bei welchem alle wichtigen Parameter und Eigenschaften des Netzwerks selbstständig und unabhängig (im Rahmen der regulatorischen Vorgaben) konfiguriert werden können. Hierbei werden mehrere LoRa Gateways an verschiedenen Positionen an der TU Ilmenau (möglichst indoor) installiert, welche die empfangenen Daten an einen zentralen Server an der TU Ilmenau versenden. Analog dazu kann dieser Server auch Daten an ein- oder mehrere Gateways schicken, um sie via LoRa an die Endgeräte zu übermitteln.

Im Bereich der Lehre hat dies den Vorteil, dass damit Studierende schnell und effizient ihre entwickelten Anwendungen und Protokolle testen können, und diese auch in größer skalierten Experimenten untersucht werden können. Dieser Umstand wurde schon in den vergangenen Projektarbeiten sehr klar deutlich, da oftmals Studierende ein größeres LoRa Netzwerk zu Debugging-Zwecken hilfreich gefunden hätten.

Aus technischer Perspektive hat ein universitätsweites LoRa Netzwerk den Vorteil, dass damit z.B. Lokalisierungsprotokolle von LoRa Endgeräten entwickelt und implementiert werden können.

Beispielsweise kann durch die bekannte Position von Gateways und die Information der Signalstärke einzelner LoRa-Nachrichten auf die ungefähre Position des Endgeräts geschlossen werden. Dies ist nur möglich, wenn man die vollständige Kontrolle über das eigene Netzwerk hat.

Des Weiteren kann LoRa Kommunikation nicht nur auf dem 868 MHz und 433 MHz Band betrieben werden, sondern mittlerweile auch auf 2.4 GHz – entsprechende Endgeräte vorausgesetzt. All diese Frequenzbänder haben unterschiedliche Ausbreitungscharakteristiken und Eigenschaften bei der Kommunikation [3].

[3] Derevianckine, Gwendoline Hochet, et al. "Opportunities and Challenges of LoRa 2.4 GHz." IEEE Communications Magazine (2023).

Analog zu LoRa Kommunikation stellt Bluetooth (und Bluetooth LE) eine alternative Kommunikationstechnologie dar, jedoch mit reduzierter Reichweite. Ähnlich zu LoRa ist hier auch der Einsatz von Gateways möglich.

Um alle diese Aspekte zu adressieren und den Studierenden auch das praktische Arbeiten mit Drahtlossystemen im Kontext von IoT zu vermitteln, sind folgende Anschaffungen geplant:

#### **1.) Bereitstellung von LoRa Gateways für 868 MHz und 2.4 GHz:**

Zum Aufbau eines universitätsweiten LoRa Netzwerks sollen mehrere Gateways für 868 MHz und 2.4 GHz angeschafft werden. Diese werden mit dem Universitätsnetzwerk verbunden und übermitteln die Daten zu einem Server an der TU Ilmenau. Dies

fördert insbesondere auch den wissenschaftlichen Nachwuchs, da die angebotenen Projekte und Arbeiten, unterstützt durch dieses LoRa Netzwerk, in der Lehre immer einen starken Forschungsbezug zum FG IoT Engineering darstellen.

## 2.) **Bereitstellung von Bluetooth LE Gateways:**

Ähnlich zu den LoRa Gateways oben sollen Bluetooth LE Gateways beschafft werden und an das Universitätsnetzwerk gekoppelt werden. Damit wird es möglich sein, auch die unterschiedlichen Charakteristiken im Kommunikationsverhalten von LoRa (auf verschiedenen Frequenzbändern) sowie Bluetooth LE den Studierenden zu vermitteln und praktisch greifbar zu machen.

## 3.) **Bereitstellung LoRa / Bluetooth Endgeräte:**

Um das geplante universitätsweite LoRa Netzwerk zu verwenden, können die vom VFFIA Antrag 2023 beschafften Raspberry Pi Shields verwendet werden. Diese unterstützen jedoch nicht LoRa auf 2.4 GHz, daher sollen für dieses Frequenzband noch Endgeräte beschafft werden.

### **Ausbildungskonzept:**

Im Rahmen der praktischen studentischen Arbeiten sollen zu den regulären Lehrveranstaltungen am FG IoT Engineering (☐ Drahtlose Eingebettete Systeme) in Zukunft auch Entwicklungsaspekte und Optimierungsaufgabenstellungen in das Lehrkonzept mit aufgenommen und in Form von Teamprojekten und Abschlussarbeiten angeboten werden.

Es ist geplant, die Teamprojekte (genauere Planung, wie sich diese anhand geeigneter Veranstaltungen in das Lehrkonzept der Fakultät integrieren lassen, erfolgt noch) als ein-semesterige Lehrveranstaltung bzw. als Projektgruppe über zwei Semester hinweg anzubieten. Studierende sollen dabei den gesamten Entwicklungsprozess durchlaufen: Systemanalyse (Anforderungsanalyse sowie Machbarkeitsstudie), Systementwurf, Detailentwurf, Validierung und Optimierung.

Das reale System kann in diesem Fall den Studierenden helfen, ihr Design zu validieren und das Ergebnis ihrer Entwurflösungen praktisch zu testen und im Hinblick einer detaillierten Leistungsanalyse zu bewerten.

Basierend auf den Vorarbeiten, welche wir an der Universität Paderborn angefertigt haben, sollen die Studierenden insbesondere an folgenden Teilaspekten ihr Wissen anhand praktischer Arbeiten vertiefen:

- Ein Kernaspekt in der Ausbildung im Kontext dieses Antrags ist es, motivierte Studierende in den Aufbau und den Betrieb des LoRa Netzwerks mit einzubeziehen. Insbesondere stellt hierbei die Installation und Konfiguration des Backend-Servers (mittels Open Source Software) als LoRa Network Servers eine zentrale Rolle. Im Kontext des Science Camps der TU Ilmenau sowie für practicING Angebote stellt das angedachte LoRa Netzwerk einen wichtigen Aspekt in der Lehre dar.
- Entwurf und Implementierung von Lokalisierungsmethoden für LoRa und Bluetooth-LE Netzwerke.  
Hierbei sollen Studierende die erlernten Konzepte von Drahtlosen Systemen anwenden, um Lokalisierungsmethoden basierend auf Informationen von empfangenen Nachrichten, z.B. Signalstärke, zu entwerfen, zu implementieren, und anschließend deren Performance quantitativ auswerten.

- Entwicklung und Erweiterung des oben erwähnten LoRa-basierten Krisenkommunikationssystems auf Basis eines verteilten Netzwerks
  - Studierende befassen sich hierbei mit der Entwicklung eines Netzwerkstacks auf Basis von LoRa, bei welchem sie die einzelnen Schichten des ISO/OSI Modells genauer betrachten. Die verwendete Hardware erlaubt, anstatt direkt mittels Unix Sockets auf Netzwerkfunktionalität des Betriebssystems zurückzugreifen, einen direkten Zugang zur Hardware. Dabei müssen die Studierenden insbesondere Wissen zum Link Layer (Framing, Medienzugriff, Multiplexing), Networking Layer (Adressierung, Routing), und Transport Layer (End-to-End, Congestion Control) erwerben. Dieses Wissen hilft den Studierenden, Kommunikationssysteme und ihre speziellen Eigenschaften im Kontext von IoT-Systemen (Energieeffizienz, Resilienz, knappe Kanalkapazität von LoRa) umfassend zu verstehen und deren Spezifika in der Protokollentwicklung zu berücksichtigen.
  - Als weiteren Schritt planen und implementieren Studierende eine verteilte Netzwerkarchitektur, um Daten basierend auf deren Informationsgehalt an die entsprechenden Knoten im Netzwerk weiterzuleiten. Hierbei stellt die Lehrveranstaltung „Drahtlose Eingebettete Systeme“ (Bachelor) der FG IoT Engineering hilfreiches Vorwissen bereit, um die gelernten Konzepte zur Informationsweiterleitung (Ad Hoc Routing, Information Centric Networking) sowie zur energieeffizienten Kommunikation in praktischen Systemen anzuwenden.
  - Aus der Perspektive eines Gesamtsystems erstellen Studierende in dem Projekt auch eine Benutzeroberfläche, oder integrieren mobile Geräte/Smartphones in das System, um ein verteiltes Krisenkommunikationsmedium basierend auf einem Chatsystem im Kontext von LoRa zu entwerfen.
  
- Die geplante Anschaffung von LoRa-/Bluetooth-Gateways kann auch für weitere Projekte in diesem Bereich verwendet werden: Z.B. Erweiterung des verteilten Waldbranderkennungssystems um Eigenschaften zur Messung von Umwelteinflüssen, Wetter und Regen. Oder der Entwurf von Systemen, um Smart Gardening und Smart Farming zu unterstützen: Das Netzwerk erfasst wichtige Parameter zur Bewässerung, Düngung und dem Erhalt von Pflanzen. Hierbei sind auch Kooperationen mit anderen Fachgebieten vorstellbar, welche sich dem Thema Sensorik widmen. Dies würde sich ideal mit den Arbeiten in unserem FG IoT Engineering ergänzen, bei welchem wir in diesem Bereich mit Arbeiten zu In-Network Processing unterstützen können.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit dem geplanten LoRa und Bluetooth-LE Netzwerk die Lehraktivitäten am Fachgebiet IoT Engineering ausgebaut und für Studierende attraktiver gemacht werden sollen. Dies hilft insbesondere, um (a) interessierte Studierende für die TU Ilmenau als Studien- und Forschungsstandort zu gewinnen, und (b) den wissenschaftlichen Nachwuchs gezielt für die eigenen Forschungsarbeiten zu fördern.

Wir danken deshalb dem Förderverein der Fakultät für die Unterstützung des Fachgebiets IoT Engineering, um den Ausbau des „Wireless Network and Computer/Communications“ Lab voranzutreiben.