

## Kurzbericht zum Vorhaben

**EXDIMUM:** Extremwettermanagement mit digitalen Multiskalen-Methoden

**Teilprojekt:** Zuverlässige Sensorkommunikation unter Extremwetterbedingungen

**Förderkennzeichen:** 02WEE1631G

**Förderzeitraum:** 1. Februar 2022 – 30. Juni 2025

**Autoren:** Andreas Reinhardt und Daniel Szafranski, Technische Universität Clausthal

*Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.*

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

### 1. AUFGABENSTELLUNG

Das Monitoring hydrologisch relevanter Parameter, wie Pegelstände, Niederschläge und Luftfeuchte, ist ein integraler Bestandteil des Extremwettermanagements. In der Praxis kommen dazu in der Regel terrestrische Sensoren zum Einsatz, welche die relevanten Parameter periodisch erfassen und drahtlos versenden. Dies ermöglicht terrestrische Daten in hoher zeitlicher sowie räumlicher Auflösung in situ zu bewerten und im Falle von Extremwetterereignissen zweierlei: zum einen, die Vorhersagen kontinuierlich abzugleichen und Anpassungen bei Abweichungen vorzunehmen. Zum anderen aber auch eine schnelle Reaktion und die Abwägung möglicher Gegenmaßnahmen, wie z.B. die präzise Aufstellung von Sandsäcken zum Hochwasserschutz.

Allerdings sinkt die Zuverlässigkeit der Sensorkommunikation im Falle von Extremwetter, durch erschwerte Bedingungen der drahtlosen Datenübertragung. Dies hat zur Konsequenz, dass zu diesen besonders relevanten Perioden im Extremfall keine aktuellen Daten zur Verfügung stehen, wodurch keine adäquate Einschätzung der realen Lage sowie präzise Gegenmaßnahmen erfolgen können.

Ziel des Teilprojekts war es daher, Methoden und Verfahren zu entwickeln, welche die Zuverlässigkeit drahtloser Übertragungen erhöhen, um auch unter Extremwetterbedingungen Daten zur Verfügung stellen zu können. Dazu sollte (1) die Leistungsfähigkeit des Kommunikationsprotokolls Long Range Wide Area Network (LoRaWAN), welches bei terrestrischen Sensoren weit verbreitet ist, unter verschiedenen Umweltbedingungen untersucht werden. Diese Analyse sollte die Grundlage schaffen, um (2) innovative Verfahren zu entwickeln, welche auch unter Extremwetterbedingungen eine zuverlässige Kommunikation ermöglichen. Anschließend sollten die entwickelten Verfahren in (3) einer Praxisstudie in der Pilotregion evaluiert werden, um die Leistungsfähigkeit der neu entwickelten Methoden im Praxiseinsatz zu bewerten.

### 2. WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND ZU BEGINN DES VORHABENS

Innerhalb der letzten Jahre, insbesondere im Zuge der Digitalisierung, hat LoRaWAN als Kommunikationsprotokoll für drahtlose Sensornetze und das Internet der Dinge (IoT) zunehmend an Bedeutung gewonnen. Durch den häufigen Einsatz von Sensorgeräten im Freien, ist der Übertragungskanal den vorherrschenden Umwelt- und Wetterbedingungen ausgesetzt, welche die Signalqualität direkt beeinflussen können. Viele Veröffentlichungen konnten Zusammenhänge zwischen individuellen Wetterkomponenten, wie Niederschlag oder Temperatur, und der Signalqualität nachweisen, im Extremfall bis hin zum kompletten Ausfall des Kommunikationskanals. Die Analysen beschränken sich jedoch oft auf einzelne Wetterkomponenten, wie Temperatur, und können die komplexen Zusammenhänge des Wetters nicht adäquat nachbilden, was weitere, praxisnahe Studien erforderlich macht.

Um auch bei Extremwetterbedingungen Daten zuverlässig übertragen zu können, sind daher Modifikationen am LoRaWAN Protokoll notwendig. Herkömmliche Methoden zur Steigerung der Zuverlässigkeit, wie etwa das Ausbringen von zusätzlichen Empfangsstationen oder das Einstellen der maximal erlaubten Sendeleistung, was eine Reduktion der Batterielaufzeit bedeutet, sind nicht zielführend, da diese mit einem signifikanten finanziellen- und Wartungsaufwand einherkommen. Daher bedarf es neuartiger Methoden und Verfahren, welche auch ohne diese Nachteile eine zuverlässige Kommunikation unter Extremwetterbedingungen ermöglichen.

Das Vorhaben war auf eine 36-monatige Laufzeit ausgelegt, welche um fünf Monate kostenneutral verlängert wurde. Dies war notwendig, denn es ergaben sich an mehreren Stellen im Projektverlauf Verzögerungen, welche während der Projektlaufzeit nicht aufgefangen werden konnten. Das Arbeitsprogramm mit Beteiligung der TUC war in sieben Arbeitspakete gegliedert. Die Hauptarbeit der TUC lag dabei in der Entwicklung eines innovativen Verfahrens zur zuverlässigen Übertragung von terrestrischen Sensordaten.

### 3. WESENTLICHE ERGEBNISSE IM ÜBERBLICK

Zur Leistungsbewertung und Einschätzung der Zuverlässigkeit von LoRaWAN unter wechselnden Wetterbedingungen wurde eine großflächige Studie in und um die Pilotregion Goslar durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass Umweltbedingungen, wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, sowie Niederschlag, einen signifikanten Einfluss auf die Signalqualität haben. Insbesondere konnte eine Reduktion der Signalqualität, bis hin zu signifikantem Datenverlust, während Regenperioden beobachtet werden.

Im weiteren Projektverlauf wurden Methoden und Verfahren entwickelt und untersucht, um die Zuverlässigkeit der Datenübertragung zu erhöhen. Eines der neu entwickelten Verfahren, PreCo, basiert auf der Annahme, dass terrestrische Sensoren, eine stark begrenzte Datenmenge (einzelne Bits bis wenige Bytes) pro Übertragung nutzen. Dies erlaubt die Vorausberechnung aller plausiblen Pakete vom Sensorwert bis zur Darstellung als Bitfolge und schlussendlich auch als Symbolfolge auf der physikalischen Übertragungsschicht. PreCo korreliert ein empfangenes Paket mit allen plausiblen Symbolfolgen. Im Falle der korrekten Symbolfolge ist die Übereinstimmung am größten und es kommt zu einer Akkumulation der Energie mehrerer Symbole, wodurch auch Pakete unterhalb typischer Empfangsschwellen demoduliert werden können und eine signifikant bessere Robustheit gegenüber Störeffekten, wie Extremwetter, erreicht wird. Mit einer weiteren Methode, CEC-LoRa, konnte das grundlegende Konzept so weit adaptiert werden, dass es auch auf herkömmlichen LoRa Empfängerchips funktioniert und damit deutlich breitere Anwendbarkeit findet.

Mit Backpack-LoRa konnte noch ein weiteres Verfahren entwickelt werden, welches insbesondere bei schwierigen topografischen Gegebenheiten, z.B. bergiges oder verbautes Gebiet, die Zuverlässigkeit der Übertragungen erhöht. LoRaWAN arbeitet per Spezifikation in einem single-hop Verfahren, d.h., sämtliche Endgeräte senden ihre Daten direkt an die Empfangsstation. Sollte ein Gerät außerhalb der Reichweite des Gateways liegen, ist keine Kommunikation möglich. Backpack-LoRa implementiert ein Verfahren zur Paketweiterleitung unter Endgeräten und kann LoRaWAN damit um die multi-hop Funktionalität erweitern.

In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Aerospace Technologie GmbH (DSI-AS) wurde ein Prototyp für ein terrestrisches Sensorsystem entwickelt und in der Pilotregion Goslar evaluiert. Während DSI-AS die Entwicklung der Hardwareplattform übernahm, entwickelte die TUC das zuverlässige drahtlose Verfahren zur Übertragung der terrestrischen Daten. Durch den Einsatz des zuvor entwickelten Kommunikationsprotokolls Backpack-LoRa konnten die Empfangsraten um bis zu 54.9 % im Vergleich zum Standard LoRaWAN erhöht werden.

## Eingehende Darstellung zum Vorhaben

**EXDIMUM:** Extremwettermanagement mit digitalen Multiskalen-Methoden

**Teilprojekt:** Zuverlässige Sensorkommunikation unter Extremwetterbedingungen

**Förderkennzeichen:** 02WEE1631G

**Förderzeitraum:** 1. Februar 2022 – 30. Juni 2025

**Autoren:** Andreas Reinhardt und Daniel Szafranski, Technische Universität Clausthal

*Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.*

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

### 1. MOTIVATION UND AUFGABENSTELLUNG

Durch den zunehmenden Trend in der Häufung von Wetterextremen in den letzten Jahren und Jahrzehnten und insbesondere auch den Vorhersagen zur zukünftigen Zunahme von extremen Wetterbedingungen [1,2], kommt dem Extremwettermanagement eine immer wichtigere Rolle zu.

Das Ziel des Gesamtvorhabens EXDIMUM war es daher, dieser wachsenden Herausforderung mithilfe von digitalen Multiskalen-Methoden zu begegnen, indem KI-Modelle Daten unterschiedlicher Quellen, wie etwa Satellitenaufnahmen, digitale Geländemodelle aber auch speziell in situ erhobene terrestrische Sensordaten, verarbeiten, um Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Wetterextremen abzuleiten.

Speziell den terrestrischen Daten kommt dabei eine zentrale Rolle zu, denn das Monitoring hydrologisch relevanter Parameter, wie Pegelstände, Niederschläge und Bodenfeuchte, ist ein integraler Bestandteil des Extremwettermanagements. In der Praxis kommen dazu typischerweise terrestrische Sensoren zu Einsatz, welche die relevanten Parameter periodisch erfassen und drahtlos versenden. Dies ermöglicht terrestrische Daten in hoher zeitlicher (typischerweise alle 10 Minuten) sowie räumlicher (Messstationen an relevanter Infrastruktur) Auflösung in situ zu bewerten und im Falle von Extremwetterereignissen zweierlei: zum einen, die Vorhersagen kontinuierlich abzugleichen und Anpassungen bei Abweichungen vorzunehmen. Zum anderen aber auch eine schnelle Reaktion und die Abwägung möglicher Gegenmaßnahmen, wie z.B. die präzise Aufstellung von Sandsäcken zum Hochwasserschutz bei sehr hohen und lokal stark unterschiedlichen Niederschlagsmengen.

Allerdings sinkt die Zuverlässigkeit der Sensorkommunikation im Falle von Extremwetter, durch erschwerte Bedingungen der drahtlosen Datenübertragung [3-5]. Dies hat zur Konsequenz, dass während diesen besonders relevanten Perioden im Extremfall keine aktuellen Daten zur Verfügung stehen, wodurch keine adäquate Einschätzung der realen Lage sowie präzise Gegenmaßnahmen erfolgen können.

Ziel des Teilprojekts der TU Clausthal (TUC) war es daher, Methoden und Verfahren zu entwickeln, welche die Zuverlässigkeit drahtloser Übertragungen erhöhen, um auch unter Extremwetterbedingungen Daten zur Verfügung stellen zu können. Dazu sollte (1) die Leistungsfähigkeit des Kommunikationsprotokolls Long Range Wide Area Network (LoRaWAN), welches bei terrestrischen Sensoren weit verbreitet ist, unter verschiedenen Umweltbedingungen untersucht werden. Diese Analyse sollte die Grundlage schaffen, um (2) innovative Verfahren zu entwickeln, welche auch unter Extremwetterbedingungen eine zuverlässige Kommunikation ermöglichen. Anschließend sollten die entwickelten Verfahren (3) in einem terrestrischen Sensorgerät implementiert, in das Gesamtsystem eingebunden

und einer Praxisstudie in der Pilotregion evaluiert werden, um die Leistungsfähigkeit der neu entwickelten Methoden im Praxiseinsatz zu bewerten.

## *2. WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND ZU BEGINN DES VORHABENS*

Innerhalb der letzten Jahre, insbesondere im Zuge der Digitalisierung, hat LoRaWAN als Kommunikationsprotokoll für drahtlose Sensornetzwerke und das Internet der Dinge (IoT) zunehmend an Bedeutung gewonnen. Durch den häufigen Einsatz von Sensorgeräten im Freien ist der Übertragungskanal den vorherrschenden Umwelt- und Wetterbedingungen ausgesetzt, welche die Signalqualität direkt beeinflussen können. Viele Veröffentlichungen konnten Zusammenhänge zwischen individuellen Wetterkomponenten, wie Niederschlag [4] oder Temperatur und Luftfeuchtigkeit [5], und der Signalqualität nachweisen, im Extremfall bis hin zum kompletten Ausfall des Kommunikationskanals [3]. Die Analysen beschränken sich jedoch oft auch einzelne Wetterkomponenten, und können die komplexen Zusammenhänge der Umgebung und des Wetters als Ganzes nicht adäquat nachbilden, was weitere, praxisnahe Studien erforderlich macht.

Um aber auch bei Extremwetterbedingungen Daten zuverlässig übertragen zu können, sind Modifikationen am LoRaWAN Protokoll notwendig. Herkömmliche Methoden zur Steigerung der Zuverlässigkeit, wie etwa das Ausbringen von zusätzlichen Empfangsstationen oder das Einstellen der maximal erlaubten Sendeleistung, einhergehend mit einer Reduktion der Batterielaufzeit, sind nicht zielführend, da diese mit einem signifikanten finanziellen- und Wartungsaufwand einherkommen. Daher bedarf es neuartige Methoden und Verfahren, welche auch ohne diese Nachteile eine zuverlässige Kommunikation unter Extremwetterbedingungen ermöglichen.

## *3. PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS*

Das Vorhaben war auf eine 36-monatige Laufzeit ausgelegt, welche um fünf Monate kostenneutral verlängert wurde. Dies war notwendig, denn es ergaben sich an mehreren Stellen im Projektverlauf Verzögerungen, welche während der Projektlaufzeit nicht aufgefangen werden konnten. Zunächst hat sich in Folge der sehr kurzfristigen Bewilligung des Projekts, der reale Projektbeginn verzögert und die entsprechende Stelle eines wissenschaftlichen Mitarbeiters konnte erst mit einer 6-wöchigen Verspätung besetzt werden. Des Weiteren ergab sich auch bei der Vergabe eines Unterauftrags eine Verzögerung durch zeitaufwendige bürokratische Schritte durch die Rahmenbedingungen im Vergaberecht. Darüber hinaus hatte sich im Projektverlauf durch die Abhängigkeiten der Arbeitspakete und insbesondere in der Zulieferung benötigter Hardware eine weitere Verzögerung ergeben. Es ließen sich nicht alle Verzögerungen während der Projektlaufzeit kompensieren, sodass eine kostenneutrale Verlängerung von 5 Monaten notwendig wurde. Das Arbeitsprogramm, mit Beteiligung der TUC, war in sieben Teile gegliedert:

AP 1: Erhebung praxisrelevanter Anforderungen und Spezifikation des Gesamtsystems. Ziel des ersten Arbeitspakets war es zusammen mit den assoziierten Partnern und dem Gesamtkonsortium die Anforderungen an das Gesamtsystem zu bestimmen und alle relevanten Spezifikationen und Schnittstellen festzulegen.

AP 2: Terrestrische Sensordatenerhebung zur Erfassung von Boden- und Vegetationszustand. Im Rahmen dieses Arbeitspakets sollte ein drahtloses Sensorsystem zur Erfassung von terrestrischen Parametern entwickelt werden. Dieses AP stellte die Hauptarbeit der TUC dar und fokussierte sich auf die Entwicklung der zuverlässigen drahtlosen Kommunikationsschnittstelle zwischen den Sensorgeräten und der Empfangsstation.

AP 5: Integration multimodaler Datenquellen in einem digitalen Abbild. In diesem Arbeitspaket stellte die TUC die drahtlos übertragenen Daten dem digitalen Abbild zur Verfügung.

AP 6: Datenfusion zu einem multiskaligen Modell und Einsatz innovativer KI-Verfahren. In diesem Arbeitspaket sollte die TUC einen Rückkanal implementieren, welcher ermöglichen sollte, Daten nicht nur vom Sensor zur Empfangsstation zu übertragen, sondern ebenfalls die Rückrichtung, für eventuelle Re-Konfigurationen.

AP 7: Grafische Datenaufbereitung zur Ableitung von Handlungsempfehlungen. Analog zu den APs 5 und 6 sollte in diesem Arbeitspaket die TUC die Kommunikation zwischen den Sensorgeräten und Empfangsstationen sowie die Weiterleitung der Daten ermöglichen.

AP 8: Praktische Fallstudien zur Validierung des Multiskalenmodells. Ziel des AP 8 war es, das Potenzial des multiskaligen Ansatzes in der Pilotregion Goslar zu untersuchen. Darüber hinaus sollte auch die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse in Regionen mit vergleichbaren Charakteristika untersucht werden.

AP 9: Projektmanagement, Dokumentation und Dissemination der Ergebnisse. Im Rahmen des letzten Arbeitspakets sollte das Management und die Bereitstellung / Präsentation der Projektergebnisse erfolgen.

Das Vorhaben wurde gemäß des skizzierten Arbeitsprogramms und der entsprechenden Arbeitspakete durchgeführt. Im ersten AP 1 wurden in Zusammenarbeit mit den assoziierten und Projektpartnern alle (Teilprojekt-relevanten) Anforderungen spezifiziert. Dazu gehörte die Festlegung der Schnittstelle zur Hardwareplattform zur Erfassung der terrestrischen Daten, welche vom Projektpartner DSI Aerospace Technologie GmbH (DSI-AS) entwickelt wurde. Diese wurde auf die Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART) Schnittstelle festgelegt und die Nutzdatenmenge umfasste 1 Byte für die terrestrischen Daten, zuzüglich 2 Bytes für den Batteriezustand und Statusmeldungen, um zukünftige Wartungsbedarfe zu erkennen. Die drahtlose Übertragung der Daten vom Sensorgerät an die Empfangsstation (Gateway) erfolgte per LoRaWAN, bzw. einer neu entwickelten modifizierten Variante, welche LoRaWAN kompatibel ist. Ebenfalls wurde die Schnittstelle zum Backend, welche vom Projektpartner AMENO entwickelt wurde und die Datenbasis für das multiskalige Modell sowie die Visualisierung der Daten darstellte, auf das Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) Protokoll festgelegt.

Im Rahmen des AP 2 erfolgte die Entwicklung des terrestrischen Sensorsystems. Die beiden Komponenten (Hardwareplattform zur Erfassung terrestrischer Daten sowie die Komponente zur zuverlässigen drahtlosen Datenübertragung) konnten dank der frühzeitigen Spezifikation der relevanten Schnittstellen größtenteils parallel von DSI-AS und der TUC entwickelt werden.

Die TUC führte zunächst praktische Untersuchungen durch, um die Leistungsfähigkeit des LoRaWAN Protokoll im Realeinsatz zu evaluieren. Dabei wurden unter anderem zwei verschiedene Aspekte untersucht. Zum einen wurde untersucht, wie sich die Signalqualität in Abhängigkeit der Entfernung und Topografie zwischen dem Sende- und Empfangsgerät verändert. Dabei konnte ein Verfahren zur effizienten Erstellung von LoRaWAN-Abdeckungskarten entwickelt und angewandt werden, welches ermöglicht mit einem Sendegerät und vergleichsweise geringem Aufwand, durch intelligente Routenplanung, eine Abdeckungskarte zu erstellen und Gebiete mit schlechter Empfangsqualität zu identifizieren. Andererseits wurden historische Metadaten bestehender LoRaWAN Geräte über eine Zeitdauer von ca. einem Jahr untersucht und signifikante Abhängigkeiten zwischen den

vorherrschenden Umweltbedingungen, insbesondere Temperatur und Niederschlag, und der Signalqualität gefunden.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen hat die TUC im Projektverlauf mehrere unabhängige Verfahren zur Steigerung der Zuverlässigkeit untersucht und entwickelt. Zunächst wurde das Konzept der konstruktiven Interferenz untersucht [6-9], welches sich jedoch im weiteren Verlauf aufgrund von sehr hohen und im Realeinsatz nicht erreichbaren Anforderungen an die Zeitsynchronität zwischen Sendegeräten als nicht zielführend herausgestellt hat.

Anschließend wurden drei weitere Verfahren, PreCo, CEC-LoRa sowie Backpack-LoRa (siehe nachfolgendes Kapitel 4) entwickelt, welche ohne exakte Zeitsynchronisierung auskommen und die Zuverlässigkeit drahtloser Übertragungen mit LoRaWAN erhöhen. Durch die speziellen topografischen Gegebenheiten der Pilotregion (bergiges, verbautes und urbanes Gebiet) wurde das Backpack-LoRa Verfahren zur Implementierung auf dem terrestrischen Sensorsystem ausgewählt. Dieses basiert auf der Weiterleitung von Paketen zwischen Endgeräten, was im Standard LoRaWAN nicht möglich ist. Dadurch können auch Geräte in Tälern oder Schluchten Daten zuverlässig bis zur Empfangsstation weiterleiten.

Das Backpack-LoRa Verfahren wurde auf der Hardwareplattform von DSI-AS integriert und das terrestrische Sensorsystem wurde in der Pilotregion ausgebracht. In einer praktischen Auswertung der Empfangsraten konnte eine Steigerung um bis zu 54,9 % erreicht werden.

Im Zuge des AP 5, 6 und 7 implementierte die TUC die MQTT-basierte Schnittstelle zwischen dem LoRaWAN Anwendungsserver und dem, durch den Projektpartner AMENO entwickelten, Backend. Die Bi-Direktionalität des Protokolls ermöglichte dabei zweierlei: zum einen die Weiterleitung terrestrischer Daten zum Backend. Andererseits aber auch die Kommunikation in Rückrichtung, wodurch eine Re-Konfiguration des Sensorgeräts erfolgen konnte, um beispielsweise die Mess- und Senderate anzupassen.

Im Rahmen des AP 8 wurde die Übertragbarkeit der Erkenntnisse und entwickelten Methoden in Transferregionen mit ähnlichen Charakteristika untersucht. Basiert auf den gesammelten Projekterfahrungen wurde dabei ein Whitepaper erstellt, welches die Anforderungen an die Transferregion, das methodische Vorgehen sowie Nutzungsbeispiele übersichtlich darstellt. Für das konkrete Teilprojekt der TUC ist eine Übertragbarkeit mit wenigen Bedingungen möglich. Dadurch, dass die entwickelten Verfahren zur zuverlässigen Datenübertragung auf dem LoRaWAN Standard basieren und das lizenzfreie Industrial, Scientific and Medical (ISM) Frequenzband nutzen, ist eine Übertragbarkeit innerhalb Deutschlands als auch darüber hinaus möglich. Durch die weite Verbreitung des LoRaWAN Protokolls ist ebenfalls an vielen Standorten bereits eine weiträumige Abdeckung gegeben, wodurch oft keine dedizierte Empfangshardware benötigt wird, und nur die entsprechenden Sensorgeräte benötigt werden.

Wie im Zuge des AP 9 geplant, hat die TUC den Koordinator (TU Braunschweig) bei der Organisation des Vorhabens unterstützt, die Ergebnisse dokumentiert und disseminiert. Dazu wurden mehrere Treffen in Person mit dem Konsortium und assoziierten Partnern sowie zahlreiche regelmäßige (ca. monatliche) Clustertreffen mit allen Partnern, welche an der Entwicklung des terrestrischen Sensorsystems beteiligt waren, in digitaler Form zum gegenseitigen Austausch und Diskussion abgehalten. Ebenfalls wurden auch Ergebnisse im Hinblick auf die Publikation wissenschaftlicher Arbeiten erzielt, davon 10 veröffentlichte sowie 2 zur Veröffentlichung akzeptierte Publikationen. Dabei wurde einer der Arbeiten sogar ein „Best Demo Award“ verliehen.

Die wichtigste Position im Budget waren Personalmittel, welche während der Projektlaufzeit planmäßig ausgegeben wurden.

Ebenso hatte ein Unterauftrag an SCALGO wesentlichen Anteil am Budget, da die TUC nicht in allen entsprechenden Belangen über eine hinreichende eigene Expertise verfügt, um die Arbeiten zielgerichtet und fachlich korrekt durchzuführen. Der Unterauftrag wurde wie geplant vergeben, um mithilfe großskaligen Simulationen der Wasserausbreitung auf Basis geometrischer Modelle durchzuführen, um die optimalen Ausbringungsorte für terrestrische Sensorik zu identifizieren und damit Input für die APs 1, 2, 7 und 8 zu liefern.

#### 4. ERZIELTE ERGEBNISSE

Zunächst wurden Untersuchungen durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit und Reichweite von LoRaWAN im Realeinsatz unter verschiedenen Aspekten auszuwerten.

Dazu wurde im ersten Schritt ein automatisierter Ansatz zur Erstellung von LoRaWAN-Abdeckungskarten [10] verfolgt, bei dem ein Sendegerät periodisch Messdaten (GPS-Position sowie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck) an alle erreichbaren Gateways sendet. Empfangsseitig werden die Messdaten zusätzlich mit der Empfangsstärke (Received signal strength indicator, kurz RSSI) für jedes Gateway ergänzt, um eine Einschätzung der Signalqualität zu erhalten. Basierend auf den GPS-Daten sowie den RSSI-Werten lässt sich so eine Heatmap erstellen, welche die Signalqualität in einer Region übersichtlich visualisiert. Dabei können Stellen und Gebiete mit schlechter Signalqualität erkannt und so kritische Bereiche frühzeitig identifizieren werden. Mithilfe geeigneter Gegenmaßnahmen, wie dem Installieren neuer oder Umpositionieren bestehender Gateways lassen sich so kritische Bereiche minimieren oder aufheben.

Eine der zentralen Komponenten eines jeden LoRaWAN Geräts ist die Antenne. Sie ermöglicht die Abstrahlung der Signale in die Umgebung und damit die drahtlose Übertragung von Daten. In einer durchgeführten Untersuchung [11] wurden kommerziell erhältliche LoRaWAN-Antennen auf ihre Eignung im praktischen Einsatz untersucht. Konkret wurden die Reflexionskoeffizienten bestimmt, welche ausdrücken, welcher Teil der Sendeleistung - aufgrund von Fehlanpassungen - von der Antenne reflektiert wird und nicht zur Abstrahlung zur Verfügung steht. Dabei konnten signifikante Unterschiede beobachtet werden. Die Untersuchung zeigte, dass die Wahl einer schlecht angepassten Antenne zu einer Reduktion der Sendeleistung um bis zu 44 % führen kann, wodurch die Reichweite um bis zu 25 % sinken kann. Die Wahl einer geeigneten Antenne kann die reflektierte Leistung und damit einhergehende Nachteile auf ein Minimum beschränken.

In großen Netzwerken mit zahlreichen LoRaWAN Geräten stellt der zeitgleiche Versand von Paketen eine Herausforderung dar. Dies ist insbesondere in urbanen Gebieten oder bei dicht ausgebrachten Geräten problematisch, da die Anzahl gleichzeitig nutzbarer, kollisionsfreier Kanäle beschränkt ist. Senden zwei Geräte ihre Daten zeitgleich auf demselben Kanal, kann es zu einer Kollision kommen, wodurch zumeist mindestens die Daten eines Geräts verloren gehen. Da die meisten Geräte jedoch Daten in festen Zeitintervallen senden, z.B. Pegelmessungen alle 10 Minuten, sind ihre zukünftigen Datenübertragungen vorhersehbar. In einer Untersuchung [12] wurde ausgewertet, wie dieses Wissen genutzt werden kann, um zukünftige Kollisionen zu erkennen. Es konnte gezeigt werden, dass Kollisionen in der Tat vorhergesagt werden können. Durch die zufällige Kanalwahl der Endgeräte kann zwar nicht explizit vorhergesagt werden, ob eine Kollision auftritt, aber dass es potenziell dazu kommen kann. In Abhängigkeit der Anzahl an zeitlich überlappenden Übertragungen kann

zudem auch die Wahrscheinlichkeit einer Kollision berechnet werden. Mithilfe einer solchen Analyse ist es möglich, kollidierende Datenübertragungen frühzeitig zu erkennen, um ggf. Gegenmaßnahmen, wie z.B. angepasste Kanalwahl zu ergreifen.

Zum Einschätzen der Zuverlässigkeit von LoRaWAN unter wechselnden Wetterbedingungen wurde eine großflächige Studie in und um die Pilotregion Goslar durchgeführt, in der 10 LoRaWAN-basierte terrestrische Sensoren über einen Zeitraum von ca. einem Jahr untersucht wurden [13, 14]. Dabei konnte gezeigt werden, dass Umweltbedingungen, wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, sowie Niederschlag, einen signifikanten Einfluss auf die Signalqualität - gemessen am RSSI sowie das Signal-zu-Rausch Verhältnis (Signal-to-noise ratio, kurz SNR) - haben. Insbesondere konnte eine Reduktion der Signalqualität, bis hin zu signifikantem Datenverlust, während Regenperioden beobachtet werden. Darüber hinaus konnten auch Regressionsmodelle entwickelt werden, welche in der Lage waren, die Signalqualität basierend auf den Umweltdaten zu schätzen. Dies ermöglicht zweierlei: zum einen kann das Endgerät selbst seine Empfangsqualität basierend auf den aktuell erfassten Umweltdaten schätzen und ggf. Gegenmaßnahmen ergreifen. Zum anderen wird so auch ermöglicht, unter Berücksichtigung der Wettervorhersagen, auch eine Einschätzung der zukünftigen Signalqualität zu geben, sodass bereits im Vorfeld Perioden mit erschwerten Übertragungsbedingungen erkannt werden können, um ebenfalls ggf. Gegenmaßnahmen zu ergreifen.

Im weiteren Projektverlauf wurden Methoden und Verfahren untersucht und entwickelt, um die Zuverlässigkeit der Datenübertragung mittels LoRaWAN zu erhöhen.

Eines der neu entwickelten Verfahren, PreCo [15], basiert auf der Annahme, dass terrestrische Sensoren, bzw. generell Geräte, die mittels LoRaWAN kommunizieren, eine stark begrenzte Datenmenge pro Übertragung nutzen, da das Protokoll für geringe Datenmengen ausgelegt ist. Übliche Datenmengen liegen im Bereich von einem Bit (z.B. Indikator, ob ein kritischer Schwellwert überschritten ist) bis hin zu wenigen Bytes (z.B. Temperatur-, Pegel-, oder Niederschlagsmessungen). Die Struktur des LoRaWAN Headers und Protokolls erlaubt so die Vorausberechnung aller plausiblen Pakete vom Sensorwert bis zur Darstellung als Bitfolge und schlussendlich auch als Symbolfolge auf der physikalischen Übertragungsschicht. Im Standardfall erfolgt das Demodulieren Symbol für Symbol, bis das gesamte Packet zusammengestellt wird. PreCo nutzt ein spezialisiertes Empfangsgerät (SDR (Software-defined radio)), um auf die Symboldarstellung des empfangenen Pakets zuzugreifen, und adaptiert diesen Vorgang, indem nicht Symbol für Symbol demoduliert wird, sondern die gesamte Folge von Symbolen mit allen plausiblen Symbolfolgen korreliert wird. Im Falle der korrekten Symbolfolge ist die Übereinstimmung am größten und es kommt zu einer Akkumulation der Energie mehrerer Symbole, wodurch auch Pakete unterhalb der typischen SNR-Schwellen demoduliert werden können. Eine praktische Auswertung mit einem LoRaWAN Endgerät zeigte, dass der SNR-Zugewinn durch PreCo im Bereich von 3.1 dB liegt und damit eine signifikant bessere Robustheit gegenüber Störeffekten, wie Extremwetter, bietet.

Um das Konzept von PreCo auf einer Vielzahl von verschiedenen Endgeräten, über SDRs hinaus, zur Verfügung zu stellen, wurde ein weiteres Verfahren, CEC-LoRa [16], entwickelt. Im Gegensatz zu PreCo kann CEC-LoRa auch auf Systemen mit handelsüblichen LoRa Chips implementiert werden, denn es ist kein Zugriff auf die Symboldarstellung des empfangenen Pakets erforderlich. Das Verfahren nutzt aus, dass selbst fehlerhaft demodulierte Pakete in der Regel zwar als korrupt markiert werden, allerdings oft noch nutzbaren Dateninhalt

enthalten, was eine Rekonstruktion des Pakets ermöglicht. Analog zu PreCo werden dafür zunächst alle plausiblen Pakete bis zur Symboldarstellung vorausberechnet. Zum Vergleich wird das fehlerhaft demodulierte Paket, welches nun als (fehlerhafte) Bitfolge vorliegt, in Software zurück in die Symboldarstellung überführt. Zwar ist die so erzeugte Symboldarstellung ebenfalls korrupt und entspricht keinem korrekten Paket, allerdings lässt sich in der Regel eine hohe Übereinstimmung mit dem tatsächlichen Paket feststellen. Da ein LoRaWAN Endgerät natürlich nur valide Pakete versendet, kann man so das ähnlichste, vorausberechnete Paket als korrekt annehmen. Dadurch, dass Pakete, welche bereits zu weit unter die SNR-Schwelle gefallen sind, grundsätzlich nicht erkannt werden können, kann im Vergleich zu PreCo ein kleinerer SNR-Zugewinn von 0.79 – 0.93 dB erreicht werden. Mit CEC-LoRa konnten in einer praktischen Evaluation bis zu 86.5 – 99.5 % aller korrupten Pakete wiederhergestellt werden.

Im weiteren Projektverlauf wurde mit Backpack-LoRa [17] noch ein weiteres Verfahren entwickelt, welches insbesondere bei schwierigen topografischen Gegebenheiten, z.B. bergiges oder verbautes Gebiet zwischen Sender und Empfänger, die Zuverlässigkeit der Übertragungen erhöht. Im Gegensatz zu den beiden vorhergehenden Verfahren, basiert Backpack-LoRa auf der Weiterleitung von Paketen über andere Endgeräte. LoRaWAN arbeitet per Spezifikation in einem single-hop Verfahren, d.h., sämtliche Endgeräte senden ihre Daten auf direkten Weg an das Gateway. Sollte ein Gerät außerhalb der Reichweite des Gateways liegen, ist keine Kommunikation möglich. Dadurch, dass Endgeräte per Spezifikation auch die Möglichkeit zum Datenempfang bieten müssen, kann eine Weiterleitung der Pakete zwischen den Endgeräten implementiert werden. Backpack-LoRa implementiert genau dies und kann LoRaWAN damit um die multi-hop Funktionalität erweitern. Statt dem Weiterleiten der gesamten Pakete werden jedoch nur die relevanten Inhalte mitgelauschter Pakete extrahiert und zusammen mit dem eigenen Datenpaket versendet. Dies ist möglich, da der LoRaWAN Header zahlreiche Felder beinhaltet, welche für die Endanwendung jedoch meist nur von geringem Interesse sind. Damit kann eine Reduktion der zu übertragenden Datenmenge erreicht werden und damit einhergehend das Einsparen von wertvollen Energieressourcen.

Um das Verfahren zu evaluieren, wurden mehrere Endgeräte in der Pilotregion Goslar ausgebracht und die Empfangsraten an mehreren Gateways untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Empfangsraten um bis zu 54.9 % gesteigert werden konnten. Insbesondere, wenn einzelne Geräte z.B. in Tälern ausgebracht werden, kann so eine Kommunikation ermöglicht werden, indem andere Geräte, welche geografisch zwischen diesen und dem Gateway liegen, die Pakete weiterleiten.

##### 5. DARSTELLUNG DES WÄHREND DES VORHABENS BEKANTT GEWORDENEN FORTSCHRITTS AUF DIESEM GEBIET BEI ANDEREN STELLEN

Durch das wachsende Interesse an LoRaWAN im Kontext von drahtlosen Sensornetzwerken (WSNs) und dem IoT wurden auch während der Projektlaufzeit Methoden zur Steigerung der Kommunikationszuverlässigkeit publiziert. Daher fand kontinuierlich ein Abgleich mit dem Stand der Wissenschaft statt. Bei der Erforschung und Publikation der eigens entwickelten Verfahren wurde daher zunächst immer eine aktuelle Literaturrecherche durchgeführt und die eigenen von verwandten Arbeiten abgegrenzt.

Zu den während der Projektlaufzeit publizierten Arbeiten gehören unter anderem Ansätze zur Paketweiterleitung, z.B. [18], bei denen mitgelauschte Übertragungen von Endgeräten bis

zum Gateway weitergeleitet werden. Im Vergleich zu unserem Ansatz, Backpack-LoRa, werden dabei jedoch in der Regel die gesamten Pakete weitergeleitet, was mit einem erhöhten Energiebedarf einhergeht. Ebenso wurden auch Verfahren zur Nachrichtencodierung vorgestellt [19], welche jedoch ebenfalls mit erhöhtem Energiebedarf einhergehen, da die zu übertragende Datenmenge des Endgeräts erhöht wird. Weitere Methoden umfassen den Einsatz von mehreren Gateways zum kollaborativem Paketempfang [20] oder eine Adaptierung der Modulation [21]. Diese Verfahren kommen jedoch mit signifikanten Nachteilen, wie der Notwendigkeit mehrerer Gateways oder tiefgehenden Modifikationen auf dem Endgerät, was mit finanziellen Mehraufwänden oder dem Austausch oder Modifikation von Endgeräten verbunden ist. Im Kontrast dazu ermöglichen unsere entwickelten Verfahren PreCo und CEC-LoRa den Einsatz mit nur einem Gateway und benötigen keinerlei Senderseitigen Veränderungen, wodurch sie verwandten Arbeiten überlegen sind.

#### 6. VORAUSSICHTLICHER NUTZEN, INSBESONDERE DIE VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE

Die entwickelten Verfahren zur zuverlässigen, drahtlosen Datenübertragung bieten sehr gute Aussichten bei der Verwertbarkeit. Durch das große und wachsende wissenschaftliche Interesse an LoRaWAN, sowie grundsätzlich WSNs und dem IoT ist auch mittel- und langfristig mit hoher Nachfrage in diesem Themengebiet zu rechnen.

Mit den neu entwickelten Verfahren PreCo, CEC-LoRa sowie Backpack-LoRa ist es möglich, Daten mit deutlich niedrigerer Signalstärke zu empfangen oder weiterzuleiten, und damit einhergehend über signifikant längere Distanzen zuverlässig zu übertragen als mit dem weit verbreiteten, Standard Protokoll LoRaWAN.

Dies bietet in zweierlei Hinsicht immense Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen. Einerseits kann man durch die höhere Abdeckung die Anzahl benötigter Empfangsstationen in einem Gebiet reduzieren, wodurch ein signifikanter finanzieller Vorteil entsteht und Wartungsarbeiten reduziert werden können. Andererseits kann aber auch Sender-seitig (Sensorik) die Sendeleistung reduziert werden. Damit kann die Batterielaufzeit der Geräte verlängert und der Wartungsaufwand minimiert werden. Speziell die beiden entwickelten Verfahren, PreCo und CEC-LoRa, bieten im Vergleich zu Konkurrenzlösungen neben den bereits genannten, auch die Vorteile, dass sie keinerlei Sender-seitigen Veränderungen benötigen und auch nur eine einzige Empfangsstation für die Implementierung ausreicht. In Kombination bieten die neu entwickelten Verfahren damit sowohl funktionale als auch wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen. Dadurch, dass alle entwickelten Verfahren auf LoRaWAN basieren, arbeiten sie im lizenzfreien ISM-Frequenzband, wodurch eine hervorragende und einfache Übertragbarkeit sowohl am Standort Deutschland als auch darüber hinaus gegeben ist. In der Summe stehen die Verfahren damit im Vergleich zu verwandten Arbeiten klar hervor, wodurch auch mittel- und langfristig die Erfolgsaussichten groß sind.

#### 7. ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN AUßERHALB DES VERBUNDPROJEKTES

Das Arbeitsprogramm wurde primär von den TUC durchgeführt. Für einzelne Aufgaben wurde jedoch ein weiterer Partner, SCALGO, per Unterauftrag eingebunden, mit dem es gemeinsame Treffen gab, um die Anforderungen und Projekthinhalte zu besprechen.

Durch die zahlreichen Publikationen im Projektverlauf und dem Präsentieren der Ergebnisse auf Fachtagungen konnte ein fachlicher Austausch und Diskussionen mit dem Fachpublikum erfolgen. Ebenso wurden Poster mit Projektergebnissen und -Inhalten auf den Statuskonferenzen zur Fördermaßnahme WaX vorgestellt, wodurch ebenfalls ein Austausch und Kontakt zu anderen WaX Projekten entstand.

## 8. VERÖFFENTLICHUNGEN, VORTRÄGE REFERATE, ETC.

1. Daniel Szafranski, Mazen Bouchur, and Andreas Reinhardt. "Investigating Constructive Interference for LoRa-based WSNs." In: Proceedings of the 19th GI/ITG KuVS Fachgespräch "Sensornetze" (FGSN). 2022, pp. 25–28.
2. Daniel Szafranski and Andreas Reinhardt. "Zuverlässiges Monitoring von hydrologischen Extremereignissen mithilfe drahtloser Sensorik," In: Abstract-Band zum Tag der Hydrologie. 2023, pp. 34–35.
3. Daniel Szafranski and Andreas Reinhardt. "ELORA: Even Longer Range Sensor Networking Through Modulated Concurrent LoRa Transmissions." In: Proceedings of the 1st IEEE Workshop on Wireless outdoor, Long-Range and Low-Power Networks (WoLoLo). 2023, pp. 388–393.
4. Daniel Szafranski and Andreas Reinhardt. "Investigating the Effects of Precipitation on the Reliability of Lossy LoRaWAN Links." In: Proceedings of the 20th GI/ITG KuVS Fachgespräch "Sensornetze" (FGSN). 2023, pp. 19-21.
5. Markus Gerke, Pedro M. Achanccaray Diaz, Sándor P. Fekete, Michael Figge, Nicola Fohrer, Simon Giutronich, Phillip Keldenich, Sebastian Lutz, Michael Perk, Andreas Reinhardt, Christoph Richter, Christian Rieck, Björn Riedel, Tim Riedemann, Fatemeh Saba, Konstantin Schrader, Anne Schröter, Daniel Szafranski, Aida Taghavi and Paul Wagner. "Extremwettermanagement mit digitalen Multiskalen- Methoden: Das EXDIMUM-Projekt," In: Beiträge der 44. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF. 2024, pp. 279–294.
6. Daniel Szafranski. "Predictability of LoRaWAN Link Quality based on Weather Data: Insight from a Long-Term Study," in Proceedings of the 25th IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2024, pp. 249–258.
7. Daniel Szafranski and Andreas Reinhardt. "LoRaWAN Channel Usage and Collision Prediction based on Transmission Behavior Profiling" In: Proceedings of the 21st GI/ITG KuVS Fachgespräch "Sensornetze" (FGSN). 2024, pp. 24-26.
8. Daniel Szafranski, Sinja Ulrich, Robert Bredereck, and Andreas Reinhardt. "Demo: LoRaWAN Coverage Assessment Using Optimal Bicycle Route Planning." In: Proceedings of the 49th IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN). 2024, pp. 1–4.
9. Daniel Szafranski and Andreas Reinhardt. "PreCo: Ultra-Low SNR LoRa Demodulation Using Pre-Computed Packet Correlation." In: Proceedings of the IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). 2025, pp. 239–248.
10. Daniel Szafranski, Andreas Reinhardt and Niels Neumann. "A Study of LoRa Antennas for the 868 MHz ISM Band: The Good, the Bad, and the Ugly". In: Proceedings of the 22nd GI/ITG KuVS Fachgespräch "Sensornetze" (FGSN). 2025. pp. 1–4.

Akzeptiert zur Veröffentlichung

11. Daniel Szafranski and Andreas Reinhardt. "CEC-LoRa: A Codeless Error Correction Method for Corrupted LoRa Packet Decoding." Accepted for publication at the 50th IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN). 2025
12. Daniel Szafranski and Andreas Reinhardt. "Backpack-LoRa: Energy-Efficient Multi-Hop Networking for LoRaWANs." Accepted for publication at the 27th International

## 9. LITERATURVERZEICHNIS

- [1]: D. Coumou and S. Rahmstorf, "A decade of weather extremes," *Nature climate change*, vol. 2, no. 7, pp. 491–496, 2012.
- [2]: C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, and Q. Dahe, *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge University Press, 2012.
- [3]: C. A. Boano, M. Cattani, and K. Römer, "Impact of Temperature Variations on the Reliability of LoRa - An Experimental Evaluation," in *Proceedings of the 7th ACM International Conference on Sensor Networks (SENSORNETS)*, 2018, pp. 39–50.
- [4]: L. Parri, S. Parrino, G. Peruzzi, and A. Pozzebon, "Offshore LoRaWAN Networking: Transmission Performances Analysis Under Different Environmental Conditions," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1–10, 2020.
- [5]: T. Ameloot, P. Van Torre, and H. Rogier, "Variable Link Performance Due to Weather Effects in a Long-Range, Low-Power LoRa Sensor Network," *Sensors*, vol. 21, no. 9, p. 3128, 2021.
- [6]: Daniel Szafranski, Mazen Bouchur, and Andreas Reinhardt. "Investigating Constructive Interference for LoRa-based WSNs." In: *Proceedings of the 19th GI/ITG KuVS Fachgespräch "Sensornetze" (FGSN)*. 2022, pp. 25–28.
- [7]: Daniel Szafranski and Andreas Reinhardt. "Zuverlässiges Monitoring von hydrologischen Extremereignissen mithilfe drahtloser Sensorik," In: *Abstract-Band zum Tag der Hydrologie*. 2023, pp. 34–35.
- [8]: Daniel Szafranski and Andreas Reinhardt. "ELORA: Even Longer Range Sensor Networking Through Modulated Concurrent LoRa Transmissions." In: *Proceedings of the 1st IEEE Workshop on Wireless outdoor, Long-Range and Low-Power Networks (WoLoLo)*. 2023, pp. 388–393.
- [9]: Markus Gerke, Pedro M. Achanccaray Diaz, Sándor P. Fekete, Michael Figge, Nicola Fohrer, Simon Giutronich, Phillip Keldenich, Sebastian Lutz, Michael Perk, Andreas Reinhardt, Christoph Richter, Christian Rieck, Björn Riedel, Tim Riedemann, Fatemeh Saba, Konstantin Schrader, Anne Schröter, Daniel Szafranski, Aida Taghavi and Paul Wagner. "Extremwettermanagement mit digitalen Multiskalen- Methoden: Das EXDIMUM-Projekt," In: *Beiträge der 44. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF*. 2024, pp. 279–294.
- [10]: Daniel Szafranski, Sinja Ulrich, Robert Bredereck, and Andreas Reinhardt. "Demo: LoRaWAN Coverage Assessment Using Optimal Bicycle Route Planning." In: *Proceedings of the 49th IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN)*. 2024, pp. 1–4.
- [11]: Daniel Szafranski, Andreas Reinhardt and Niels Neumann. "A Study of LoRa Antennas for the 868 MHz ISM Band: The Good, the Bad, and the Ugly". In: *Proceedings of the 22nd GI/ITG KuVS Fachgespräch "Sensornetze" (FGSN)*. 2025. pp. 1–4.
- [12]: Daniel Szafranski and Andreas Reinhardt. "LoRaWAN Channel Usage and Collision Prediction based on Transmission Behavior Profiling" In: *Proceedings of the 21st GI/ITG KuVS Fachgespräch "Sensornetze" (FGSN)*. 2024, pp. 24-26.
- [13]: Daniel Szafranski and Andreas Reinhardt. "Investigating the Effects of Precipitation on the Reliability of Lossy LoRaWAN Links." In: *Proceedings of the 20th GI/ITG KuVS Fachgespräch "Sensornetze" (FGSN)*. 2023, pp. 19-21.

- [14]: Daniel Szafranski. "Predictability of LoRaWAN Link Quality based on Weather Data: Insight from a Long-Term Study," in Proceedings of the 25th IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2024, pp. 249–258.
- [15]: Daniel Szafranski and Andreas Reinhardt. "PreCo: Ultra-Low SNR LoRa Demodulation Using Pre-Computed Packet Correlation." In: Proceedings of the IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). 2025, pp. 239–248.
- [16]: Daniel Szafranski and Andreas Reinhardt. "CEC-LoRa: A Codeless Error Correction Method for Corrupted LoRa Packet Decoding." **Accepted for publication** at the 50th IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN). 2025.
- [17]: Daniel Szafranski and Andreas Reinhardt. "Backpack-LoRa: Energy-Efficient Multi-Hop Networking for LoRaWANs." **Accepted for publication** at the 27th International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM). 2025.
- [18]: P. Tian, C. A. Boano, X. Ma, and J. Wei, "LoRaHop: Multihop Support for LoRaWAN Uplink and Downlink Messaging," IEEE Internet of Things Journal, vol. 10, no. 17, pp. 15 376–15 392, 2023.
- [19]: L. Mei, Z. Yin, S. Wang, X. Zhou, T. Ling, and T. He, "ECRLoRa: LoRa Packet Recovery under Low SNR via Edge–Cloud Collaboration," ACM Transactions on Sensor Networks, vol. 20, no. 2, pp. 1–25, 2024.
- [20]: J. Du, Y. Ren, Z. Zhu, C. Li, Z. Cao, Q. Ma, and Y. Liu, "SRLoRa: Neural-enhanced LoRa Weak Signal Decoding with Multi-gateway Super Resolution," in Proc. of the 24th ACM International Symposium on Theory, Algorithmic Foundations, and Protocol Design for Mobile Networks and Mobile Computing, 2023, pp. 270–279
- [21]: W. Chen, J. Zhang, X. Xia, S. Wang, and T. He, "Hitting the Sweet Spot: An SF-any Coding Paradigm for Empowering City-Wide LoRa Communications," in Proc. of the 23rd ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, 2024, pp. 225–236