


Eine dezentrale, Mesh-basierte Plattform zur Überwachung von Nutztieren für ländliche Gebiete mit eingeschränkter Konnektivität

Milan Ferus-Comelo 

Duale Hochschule Baden-Württemberg
Stuttgart, Deutschland

milan.ferus-comelo@lehre.dhbw-stuttgart.de

Fabian Galka

Duale Hochschule Baden-Württemberg
Stuttgart, Deutschland

fabian.galka@lehre.dhbw-stuttgart.de

Daniel Strauß

Duale Hochschule Baden-Württemberg
Stuttgart, Deutschland

daniel.strauss@lehre.dhbw-stuttgart.de

Zusammenfassung—In den letzten Jahren ist die Nachfrage nach kostengünstigen, nachhaltigen und lokalen Lösungen zur Nutztierüberwachung stark angestiegen. Grund dafür sind die steigenden Kosten durch Tierverluste, die durch mangelnde Gesundheitsüberwachung, Raubtierrisse, Diebstähle oder Fluchtversuche verursacht werden. FarmLink bietet Landwirten eine moderne, digitale Überwachungslösung, die unabhängig von Mobilfunknetzen selbst in den entlegensten Regionen der Welt effizient eingesetzt werden kann. Das Weidemanagement-System implementiert ein selbstheilendes LoRa-Mesh-Netzwerk mit energieeffizientem Power-Management für einen monatelangen Betrieb.

Index Terms—LoRa, Meshtastic, Herd-Monitoring, Tracking, GPS, Tierüberwachung, Landwirtschaft, IoT

I. EINFÜHRUNG

FÜR landwirtschaftliche Betriebe ist eine zuverlässige Überwachung von Nutztieren entscheidend, um Tierverluste durch Krankheiten, Flucht, Raubtiere oder Diebstahl zu vermeiden und gleichzeitig die Anforderungen an Tierwohl und Wirtschaftlichkeit zu erfüllen. Studien zeigen, dass solche Verluste weltweit zu erheblichen wirtschaftlichen Schäden führen: In den USA beliefen sie sich im Jahr 2015 auf rund 3,9 Milliarden US-Dollar, was einem Anstieg von 800 Millionen US-Dollar im Vergleich zu 2005 entspricht [1]. Auch in Europa nehmen Risiken, wie steigende Raubtierbestände, wieder zu [2], [3]. Zudem verschärfen zunehmende Fälle von Viehdiebstahl die Situation: In Großbritannien wurden 2020 Schäden von etwa 2,7 Millionen Euro gemeldet [4] und im Dartmoor-Nationalpark wurden einem Landwirt innerhalb eines Jahrzehnts über 4.500 Schafe entwendet [5]. Parallel dazu bestehen weiterhin strukturelle Herausforderungen im Tierwohlmanagement, die eine regelmäßige und zuverlässige Kontrolle der Tiere erforderlich machen [6].

In der Praxis sind konventionelle Schutzmaßnahmen [7] wie Herdenschutzhunde, Zäune, regelmäßige manuelle Kon-

FarmLink ist ein Projekt, das aus dem Studentenwettbewerb *Competition of Students in Microsystems Applications (COSIMA) 2025* hervorgegangen ist und bei diesem bundesweiten Wettbewerb den dritten Platz erreichte. COSIMA 2025 fand im Rahmen des Microsystemtechnik (MST)-Kongresses 2025 in Duisburg statt. Die drei Autoren waren zu Beginn des Wettbewerbs an der Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Stuttgart tätig und absolvierten dort ihren Bachelor of Engineering in Embedded Systems.

trollen oder die akustische Lokalisierung über Tierglocken [8] weit verbreitet. Sie stoßen jedoch hinsichtlich Wirksamkeit, Kosten und Arbeitsaufwand an Grenzen. Insbesondere auf weitläufigen Weiden können Tiere leicht entlaufen, unbemerkt erkranken oder gestohlen werden, während eine lückenlose manuelle Überwachung für viele Betriebe kaum realisierbar ist.

Solche Situationen führten zu einem starken Wachstum auf dem Markt für Nutztierüberwachung. Es wird vorhergesagt, dass das Marktvolumen in Europa und den USA in den nächsten acht Jahren um 8% [9] bzw. 12% [10] steigen wird. Die Nachfrage nach digitalen und smarten Überwachungslösungen wird in den kommenden Jahren weiter zunehmen.

II. AKTUELLE ANSÄTZE DER TIERÜBERWACHUNG

Landwirten stehen viele unterschiedliche Methoden und Systeme zur Verfügung, die ihnen digitale und smarte Lösungen zur Nutztierüberwachung bieten. Diese Systeme werden in zwei Gruppen eingeordnet: Gesundheitsüberwachung und Tierlokalisierung [11].

Die Gesundheitsüberwachung dient bei Nutztieren der Vorbeugung von Krankheiten und Verletzungen, um im Bedarfsfall schneller reagieren zu können und diese im besten Fall zu verhindern. Bei Rindern gibt es Methoden, mit denen sich mithilfe von Bolus-Sensoren im Körper die Vitalwerte erfassen lassen [12]. Die erfassten Daten werden mit Long Range (LoRa) an Referenzknoten weitergeleitet, die in einem Mesh-Netzwerk verbunden sind. Einer dieser Knoten übermittelt die Daten dann mittels 5G. Die Herausforderung dieses Systems ist die reduzierte Signalreichweite der Sensoren, da Körperflüssigkeiten die Datenübertragung per LoRa erschweren. Die limitierten Reichweiten ermöglichen somit hauptsächlich die Überwachung in der Stallhaltung. Eine andere Methode, um die Vitalwerte der Tiere zu erfassen, ist die Erfassung der Umgebungswerte in Echtzeit mit Sensoren [13]. Übertragungsarten wie Mobilfunk und LoRa ermöglichen sehr weite Reichweiten und machen das System somit für die Weide- und Stallhaltung effektiv.

Tierlokalisierungsmethoden dienen der schnellen Ortung und helfen dabei, hohe Anschaffungskosten für Zäune oder Herdenschutzhunde zu vermeiden [11]. Meist wird Tierlokalisierung mit einem Tracker gelöst, der am Tier befestigt wird. Je nach Typ erhalten die Tiere unterschiedliche Arten von Trackern, die für verschiedene Zwecke ausgelegt sind. Halsbandtracker mit Solarfunktion [14] können über Satellitennavigationssysteme wie Global Positioning System (GPS) ihre Position erfassen und mithilfe von Bewegungssensoren einige Daten zur Tiergesundheit sammeln. Alle diese Tracker übermitteln die Daten über Mobilfunk in Kombination mit Bluetooth. Das vermeidet die Notwendigkeit von Basisstationen, allerdings macht es die Tracker von Regionen mit guter Mobilfunkabdeckung abhängig. Eine andere Möglichkeit ist die Positionsbestimmung mittels GPS als Eartag am Tier [15]. Tiere in der Umgebung, die nicht mit einem GPS-Modul ausgestattet sind, können jedoch über Bluetooth eine approximative Positionsschätzung erhalten. Diese Tracker nutzen LoRa, um ihre Daten in ein lokales LoRa-Netzwerk zu übermitteln. LoRa ermöglicht die Netzwerkkommunikation auch in weit abgelegenen Gebieten ohne Mobilfunk und macht somit die Positionsbestimmung in abgelegenen Weiden möglich. Da GPS sehr energiehungrig ist, gibt es auch weitere Lokalisierungsmethoden wie Received Signal Strength Indicator (RSSI) [16], die häufig für Indoor-Positionierung genutzt wird. Ein solches System nutzt Sensoren am Tier, welche die erfassten Daten per Funk in ein Wireless Sensor Network (WSN) übertragen [11].

Diese Beispiele sind nur einige der verschiedenen Möglichkeiten und Ansätze, um Nutztiere zu überwachen, zu lokalisieren und bei Gesundheitsänderungen rechtzeitig zu reagieren. Es gibt jedoch viele Herausforderungen bei mobilen Geräten am oder im Tier. Der Energieverbrauch ist einer der Hauptschwerpunkte, die es zu verbessern und zu optimieren gilt. Ein reduzierter Energieverbrauch garantiert eine längere Laufzeit des Geräts [11]. Dies ist vor allem in abgelegenen Regionen wichtig, in denen die Tiere, wie in den Alpen, den ganzen Sommer auf der Weide bleiben. Bei einer großen Anzahl an Tieren mit Geräten kann es sehr aufwändig werden, jedes Gerät aufzuladen oder die Batterien zu tauschen. Wireless Local Area Network (WLAN)-Netzwerke haben eine begrenzte Reichweite, daher setzen viele Produkte auf Mobilfunk [11]. Allerdings benötigen diese Systeme eine gute Mobilfunkverbindung. Andere Netzwerksysteme wie LoRa sind deutlich energieeffizienter [11] und können eigene lokale Netze aufbauen [17]. Unser Projekt *FarmLink* kombiniert mehrere dieser Ansätze und optimiert die lokale Konnektivität und Datenübertragung der einzelnen Tracker.

III. FARMLINK

Das Ziel von FarmLink ist es, ein praxisnahes, bezahlbares und datenschutzfreundliches Produkt zu entwickeln. Mithilfe eines dezentralen LoRa-Mesh-Netzwerks können Daten auch ohne Mobilfunk oder zentrale Gateways übertragen werden. Dadurch ist es möglich, Informationen über den Standort und das Verhalten der Tiere auch in abgelegenen Regionen

zu erfassen. Die gewonnenen Daten dienen nicht nur der Ortung, sondern ermöglichen auch neue Erkenntnisse über das Verhalten der Tiere, die Nutzung der Weiden und den Gesundheitszustand.

A. Verwendete Technologien

1) *LoRa*: LoRa ist ein energieeffizientes Funkverfahren auf Basis von Chirp Spread Spectrum (CSS). Es wurde für die Übertragung kleiner Datenmengen über große Entfernungen entwickelt. Es nutzt lizenzfreie Sub-GHz-Frequenzen, vor allem 868 MHz in Europa und erreicht Reichweiten von bis zu 15 km bei sehr niedrigen Datenraten. Aufgrund des geringen Energieverbrauchs können Geräte jahrelang batteriebetrieben arbeiten, was LoRa besonders für Anwendungen wie Umweltmonitoring und Landwirtschaft interessant macht [17].

2) *Meshtastic*: Bei Meshtastic handelt es sich um ein Open-Source-Projekt, das die LoRa-Funktechnik mit einer flexiblen Firmware nutzt, um stromsparende Mesh-Netzwerke zu realisieren. Die Software läuft auf embedded Mikrocontroller und ermöglicht es jedem Knoten, Daten zu empfangen und weiterzuleiten. Dadurch entstehen weitreichende, robuste und einfach skalierbare Netzwerke. Der Datenaustausch ist verschlüsselt, die Konfiguration erfolgt komfortabel per App und die offene Firmware erlaubt individuelle Anpassungen [18].

B. Systemarchitektur

Die FarmLink-Architektur, in Abbildung 1 dargestellt, basiert auf einem dreischichtigen Modell aus GPS-Trackern, einer Basisstation und einem Cloud-Backend. Die Tracker erfassen Positionsdaten, die von der Basisstation gebündelt und analysiert werden. Optional übernimmt die Cloud die Analysen und Visualisierung.

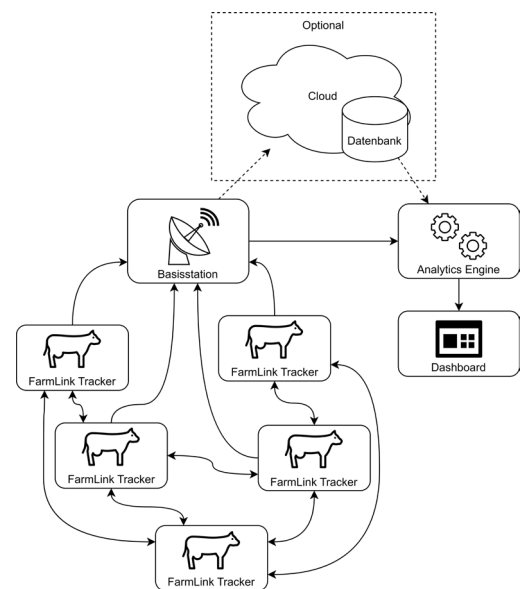


Abbildung 1. FarmLink Systemarchitektur

Das System nutzt ein dezentrales LoRa-Mesh-Netzwerk auf Basis von Meshtastic. Jeder Tracker arbeitet dabei als eigener

Knoten und Repeater. Dadurch entsteht eine selbstheilende, ausfallsichere Struktur ohne zentrale Abhängigkeiten. Geräte in der Nähe der Basisstation senden direkt, weiter entfernte Tracker kommunizieren über mehrere Hops.

Die Tracker erfassen in vordefinierten festen Intervallen GPS-Daten und übertragen diese an die Basisstation. Die Basisstation aggregiert die Pakete und speichert sie lokal ab. Die Analyse und Visualisierung der Daten kann direkt vor Ort erfolgen, sodass die Daten vollständig beim Landwirt verbleiben und die Privatsphäre gewahrt bleibt. Optional können die Daten per gesicherter 5G-Verbindung in die Cloud übertragen werden, um weiterführende Analysen wie Mustererkennung und Vorhersagen zu ermöglichen.

Mehrere Routing-Pfade gewährleisten die Datenübertragung auch bei Ausfällen von Knotenpunkten. Die Basisstation kann Daten über einen Zeitraum von mehreren Wochen lokal puffern und synchronisiert sie automatisch nach Netzunterbrechungen.

Tracker lassen sich ohne zusätzliche Konfiguration hinzufügen und integrieren sich selbstständig ins Mesh-Netzwerk. Größere Herden können mit mehreren Basisstationen abgedeckt werden. Die modulare Software ermöglicht die Erweiterung um zusätzliche Sensoren und Edge-Computing-Funktionen.

C. Tracker

Die Tracker basieren auf einem energieeffizienten nRF52-Mikrocontroller mit einem Schlafstrom von unter 3 μA [19]. Kurze Aktivphasen für GPS-Fixes und LoRa-Übertragungen ermöglichen eine sehr niedrige Durchschnittsleistung und somit einen monatelangen Betrieb. GPS und Funk werden adaptiv gesteuert, um Fix-Zeit, Reichweite und Energieverbrauch zu optimieren. Die Konstruktion der Tracker ist in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 2. FarmLink Tracker

Das Gehäuse ist witterungsbeständig und robust ausgeführt. Es besteht aus zwei verschraubbaren, mittels additiver Fertigung hergestellten Halbschalen, die die Elektronik, die Antenne und den Akku sicher aufnehmen. Seitliche Schlitz ermöglichen die direkte Befestigung am Halftergurt, ohne dass zusätzliche Hardware benötigt wird. Die Konstruktion erleichtert zugleich Wartung und Batteriewechsel.

D. Basisstation

Die Basisstation bildet das zentrale Gateway zwischen dem LoRa-Mesh im Feld und der Cloud und ist somit ein zentraler Bestandteil der FarmLink-Architektur. Sie empfängt die

von den Trackern über das dezentrale LoRa-Mesh-Netzwerk gesendeten Positionsdaten, bündelt und speichert diese lokal. Die Analyse und Visualisierung der Daten kann direkt vor Ort erfolgen, sodass die Daten vollständig beim Landwirt verbleiben und die Privatsphäre gewahrt bleibt. Durch die lokale Speicherung und Analyse der Daten bleibt das System auch bei temporären Netzunterbrechungen autonom und synchronisiert die Daten nach Wiederherstellung der Verbindung automatisch mit der Cloud.

Als Supernode im Mesh-Netzwerk übernimmt die Basisstation auch die Funktion eines Repeaters und trägt zur Netzstabilität und Ausfallsicherheit bei. Sie kann mehrere Routing-Pfade unterstützen und gewährleistet die Datenübertragung auch bei Ausfällen einzelner Knoten.

Optional übernimmt sie zusätzliche Funktionen wie lokale Warnungen, die Ansteuerung von Signalleuchten oder die Integration in betriebliche Managementsysteme. Aufgrund ihrer modularen Softwarearchitektur ist sie erweiterbar, z.B. um Machine Learning (ML)-basierte Vorfilterung oder direkte Kommunikation mit mobilen Geräten über WLAN oder Bluetooth. Die Kombination von LoRa-Mesh und 5G-Backhaul ergibt ein zweistufiges Kommunikationssystem, das Reichweite und Robustheit vor Ort mit einer leistungsfähigen Anbindung an die Cloud verbindet.

E. Dashboard

Abbildung 3 zeigt die Frontend-Schicht, die einen responsiven Zugriff auf alle Echtzeit- und Analysedaten ermöglicht. Für die grafische Benutzeroberfläche kommt Angular v20 als Framework zum Einsatz. Die Anwendung ist als Progressive Web App (PWA) umgesetzt und läuft direkt im Browser, wodurch sie auch offline genutzt werden kann.

Die Analysearchitektur ist modular aufgebaut. Eine lokale Engine übernimmt Echtzeitfunktionen wie Geofencing, Abweichungs- und Inaktivitätserkennung, während eine optionale Cloud-Komponente aggregierte Zeitreihen für prädiktive Analysen und Heatmaps verarbeitet.

Das Dashboard ist um eine Live-Kartenansicht zentriert, in der jedes Tier als dynamisch aktualisiertes Symbol erscheint. Mithilfe des Geofence-Tools können virtuelle Grenzen gesetzt und Warnmeldungen bei Grenzverletzungen ausgelöst werden. Historische Routen und Heatmaps lassen sich für bestimmte Zeiträume abrufen.

Zu den weiteren Funktionen gehören eine Alarmverwaltung sowie Echtzeitbenachrichtigungen bei auffälligem Verhalten. Über die Weboberfläche können Landwirte diese Meldungen ortsunabhängig abrufen.

IV. AUSBLICK

FarmLink befindet sich noch in der frühen Prototypenphase. Grundlegende Tests haben jedoch bereits die Funktionalität der GPS-Ortung und der Datenübertragung zwischen mehreren Geräten belegt. Die derzeitige Laufzeit eines Trackers beträgt etwas mehr als einen Monat.

Als Nächstes sollen diese Tracker in einem realen Umfeld auf einer Weide mit vielen Tieren angewendet werden, um

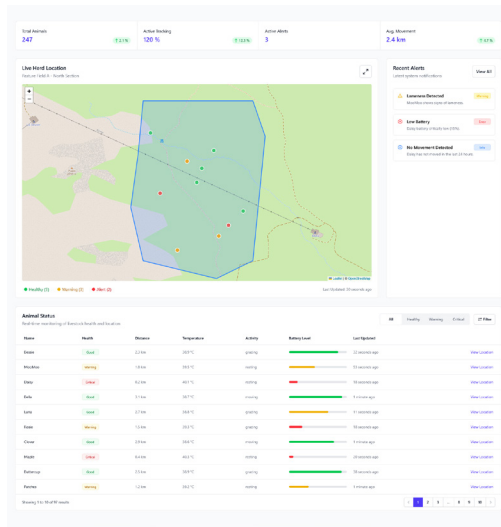


Abbildung 3. FarmLink Dashboard

mögliche Engpässe bei der Datenübertragung, der Signalreichweite und der Laufzeit festzustellen. Insbesondere muss die Belastung des Mesh-Netzwerks während der kontinuierlichen Datenübertragung von sehr vielen Geräten geprüft werden. Durch die praktische Anwendung ergeben sich auch Optimierungen der Tracking-Performance und Analysequalität. Mit den nächsten Prototypen wird bereits an Verbesserungen der Tracker geforscht. So sollen zusätzliche Sensorfunktionen für die Bewegung der Tiere integriert werden. Derzeit besitzt der Tracker nur einen Akku mit begrenzter Laufzeit. Hier kommen Energieharvesting-Methoden, wie Solar, in Frage, um manuelle Ladezyklen so minimal wie möglich zu halten.

V. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des COSIMA-Wettbewerbs 2025 wurde das bewährte Konzept der GPS-basierten Tierüberwachung aufgegriffen und zu einem fortschrittlichen Weidemanagementsystem weiterentwickelt. Das FarmLink-System kombiniert energieeffiziente LoRa-Funktechnik mit einem selbstheilenden Mesh-Netzwerk. Dadurch ist die Überwachung von Nutztieren auch in abgelegenen Gebieten ohne Mobilfunkabdeckung möglich. Die Systemarchitektur ermöglicht eine kontinuierliche Positionsbestimmung bei extrem niedrigem Energieverbrauch und gewährleistet einen monatelangen Betrieb mit einer einzigen Batterieladung. Darüber hinaus wurde ein Dashboard entwickelt, das Echtzeitmonitoring mit intelligenter Verhaltensanalyse und prädiktiven Warnfunktionen verbindet.

LITERATUR

- [1] United States Department of Agriculture, "Death Loss Trends in the U.S. Cattle Industry: 1990-2015," 2023. besucht am 11. Nov. 2025. Adresse: <https://www.aphis.usda.gov/sites/default/files/cattle-death-loss-1990-2015-info.pdf>.
- [2] I. Reinhardt und G. Kluth, "Large Carnivore Impacts, Case Study: Saxony, Germany. Insight into a Wolf - Livestock Conflict 25 Years after Wolf Recolonization," EU Platform for the Coexistence of People und Large Carnivores, Berlin, 2024.

- [3] Dokumentations- und Beratungsstelle des Bundes zum Thema Wolf, "Bundesweite Schadensstatistik," 2025. besucht am 17. Nov. 2025. Adresse: <https://www.dbb-wolf.de/wolfsmanagement/herdenschutz/schadensstatistik>.
- [4] S. Wirtschaft, "Landwirte im Vereinigten Königreich beklagen Millionenschaden," 2021. besucht am 18. Nov. 2025. Adresse: <https://www.spiegel.de/wirtschaft/grossbritannien-landwirte-beklagen-millionenschaden-durch-viehdiebstahl-a-d9ebc326-5e25-49fb-9957-3ead34ff9452>.
- [5] C. Cox, "I've lost 4500 sheep to thieves on Dartmoor," 2025. besucht am 18. Nov. 2025. Adresse: <https://www.bbc.com/news/articles/cly44r4pvd5o>.
- [6] A. Botzki und M. Wolfschmidt, "foodwatch Report 2023, Tierleid im Einkaufskorb. Warum alle Haltungsformen Nutztiere krank machen und wie sich das ändern lässt.," 2023. besucht am 18. Nov. 2025. Adresse: <https://www.foodwatch.org/de/tierleid-im-einkaufskorb-warum-alle-haltungsformen-nutztiere-krank-machen-und-wie-sich-das-aendern-laesst>.
- [7] Landesschafzuchtverband Baden-Württemberg e.V., "Herdenschutz in Baden-Württemberg; Erfahrungen und Empfehlungen für die Praxis," 2021. besucht am 19. Nov. 2025. Adresse: https://www.herdenschutz.dvl.org/fileadmin/user_upload_herdenschutz/Fachinformationen/2020_Broschuere_Herdenschutz_BW.pdf.
- [8] U. Bauer, "Kuhglocken - Lebensretter oder Tierquälerei?," 2019. besucht am 19. Nov. 2025. Adresse: <https://www.aktionier.org/artikel/kuhglocken-lebensretter-oder-tierquaelerei>.
- [9] Market Data Forecase, "Europe Livestock Monitoring Market Report," 2025. besucht am 19. Nov. 2025. Adresse: <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/europe-livestock-monitoring-market>.
- [10] Grand View Research, "U.S. Livestock Monitoring Market (2025-2033)," 2025. besucht am 19. Nov. 2025. Adresse: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/us-livestock-monitoring-market-report>.
- [11] V. M. T. Aleluia, V. N. G. J. Soares, J. M. L. P. Caldeira und A. M. Rodrigues, "Livestock Monitoring: Approaches, Challenges and Opportunities," *IJEAT*, Jg. 11, Nr. 4, S. 67-76, 2022. DOI: 10.35940/ijeat.D3458.0411422.
- [12] C. Brockmann u. a., "Modular 5G-Communication and Radar based Animal Health Monitoring System for Smart Live Stock Farming," in *Mikrosystemtechnik-Kongress 2025 (MST2025)*, Duisburg, Deutschland: VDE Verlag, 2025, S. 379-381, ISBN: 978-3-8007-6614-7.
- [13] Envira, "Animal Health Monitoring on Farms," besucht am 21. Nov. 2025. Adresse: <https://envira.global/animal-health-monitoring-farms/>.
- [14] Nofence, "Nofence Products," besucht am 19. Nov. 2025. Adresse: <https://www.nofence.no/en-us/pricing>.
- [15] mOOvement, "mOOvement GPS and BLE ear tags," besucht am 21. Nov. 2025. Adresse: <https://www.moovement.com.au/>.
- [16] L. Nóbrega, P. Pedreiras und P. Gonçalves, "SheepIT - An Electronic Shepherd for the Vineyards," in *International Conference on Information and Communication Technologies in Agriculture, Food and Environment (HAICTA 2017)*, Chania, Griechenland, 2017, S. 379-381. Adresse: https://eur-ws.org/Vol-2030/HAICTA_2017_paper75.pdf.
- [17] LoRa Alliance, "What is LoRaWAN?" Besuch am 20. Nov. 2025. Adresse: <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>.
- [18] Meshtastic LLC, "Meshtastic Introduction," besucht am 20. Nov. 2025. Adresse: <https://meshtastic.org/docs/introduction/>.
- [19] Nordic Semiconductor, "Nordic Semiconductor Bluetooth LE," besucht am 21. Nov. 2025. Adresse: <https://www.nordicsemi.com/Products/Wireless/Bluetooth-Low-Energy>.