

Energieautarkes LoRaWAN-Sensornetzwerk und integrierte IoT-Datenmanagementplattform für Smart-City- und Umweltmonitoring – Pilotprojekt „IoT-Lab“ der TU Bergakademie Freiberg

Pal Arki¹, Yvonne Joseph¹, Thomas Schumann², Jörn Kunze³, Knut Voigtländer³

*¹Institut für Nanoskalige und Biobasierte Materialien, TU Bergakademie Freiberg,
Gustav-Zeuner Str. 3, 09599, Freiberg, Deutschland*

*²Institut für Informatik, TU Bergakademie Freiberg,
Bernhard-von-Cotta-Straße 2, 09599 Freiberg, Deutschland*

*³Advanced Data Processing Dresden GmbH,
Breitscheidstraße, 78/Haus C1, 01237 Dresden, Deutschland*

Zusammenfassung

Die vollflächige Integration von Multisensoren für Smart-City- und Umweltmonitoring-Anwendungen setzt eine autarke, kabellose Netzwerkinfrastruktur voraus. Aufgrund seiner hohen Reichweite und seines geringen Energieverbrauchs eignet sich das funkbasierte Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) besonders für die Übertragung von Multisensordaten. Als Low-Power-Wireless-Technologie bietet LoRaWAN gegenüber dem LTE-Mobilfunkstandard sowie lokalen WLAN-Technologien zahlreiche Vorteile und eine höhere Flexibilität. Der in Europa lizenzfrei nutzbare Frequenzbereich von 868 MHz ermöglicht zudem einen kostengünstigen Betrieb. Beim Einsatz von Hunderten Internet-of-Things- (IoT-) Geräten fallen die Kosten im Vergleich zu kommerziellen, mobilfunkbasierten Sensornetzwerken deutlich geringer aus. Auf Basis dieser Infrastruktur wurde ein cloudbasiertes IoT-Datenmanagementsystem entwickelt, das Messwerte von Sensoren in den Bereichen Smart City und Smart Campus, einschließlich Energie-, Gebäude- und Umweltmonitoring, speichert und auswertet. Es umfasst eine skalierbare Datenbank, einen MQTT-Server, eine Dashboard-Anwendung sowie automatisierte Berichtsfunktionen. Die Plattform „IoT-Lab“ der TU Bergakademie Freiberg ermöglicht die Integration eigenentwickelter und kommerzieller Sensor-Nodes sowie die Speicherung, mobile Anzeige, historische Abfrage und Analyse von Sensordaten. Das System stellt aktuelle Messwerte über eine Applikation bereit. Gespeicherte Daten können als Verlaufsdigramme visualisiert werden; zudem werden täglich automatisierte E-Mail-Berichte generiert. Für weiterführende Analysen sind direkte Datenbankabfragen möglich. Mithilfe der Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis, PCA) auf Basis der Singulärwertzerlegung (Singular Value Decomposition, SVD) können Zusammenhänge, Trends und Anomalien erkannt werden. Ein kontinuierliches Monitoring von Empfangssignalstärke (RSSI), Signal-to-Noise Ratio (SNR) und Batteriestatus unterstützt außerdem die frühzeitige Erkennung von Ausfällen und Kommunikationsproblemen.

Keywords: LoRaWAN-Sensornetzwerk, Smart- City und Umweltmonitoring, IoT-Datenmanagement, energieautarke Sensorstationen, Principal Component Analysis

Einleitung

Die intelligente Vernetzung von Multisensoren bildet eine wesentliche Grundlage für moderne Städte und Universitäten der Zukunft. Für die Realisierung digitaler Smart-City- und Umweltmonitoring-Lösungen werden energie- und kosteneffiziente sowie robuste und langlebige Sensoren und Aktoren benötigt. Diese müssen über zuverlässige drahtlose Verbindungen mit entsprechenden Applikationsservern kommunizieren, um

Messdaten, Zustände oder Sollwerte auszutauschen.

Eine effiziente Möglichkeit, Geräte über große Distanzen bei geringem Energieverbrauch drahtlos miteinander zu vernetzen, bietet die LoRa-Funktechnologie. Darauf aufbauend wurde das Netzwerkprotokoll LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) entwickelt, das die Datenübertragung von den Sensoren über Gateways bis hin zum Applikationsserver organisiert. Sowohl kommerzielle als auch frei

zugängliche LoRaWAN-Netze sind verfügbar, weisen jedoch regional eine stark unterschiedliche Abdeckung und Ausprägung auf.

Insbesondere in Klein- und Mittelstädten befindet sich der Ausbau von LoRaWAN-Netzwerken auf regionaler, nationaler und globaler Ebene weiterhin im Aufbau. In der Universitätsstadt Freiberg (Sachsen), zwischen Dresden und Chemnitz gelegen, war LoRaWAN bis vor Kurzem noch nicht verfügbar.

Ziel war es, in Freiberg ein energieautarkes LoRaWAN-Sensornetzwerk sowie eine integrierte IoT-Datenmanagementplattform im Rahmen des Pilotprojekts „IoT-Lab“ zu etablieren. Das Projekt bezieht sowohl den Campus als auch das Stadtgebiet ein. Universität, Stadt, Unternehmen sowie Bürgerinnen und Bürger sollen dadurch die freie IoT-Plattform gemeinsam nutzen können. Im Mittelpunkt stehen der Aufbau einer LoRaWAN-Infrastruktur sowie die einfache und offene Implementierung geeigneter Sensorik. Darüber hinaus sollen nachhaltige IoT-Lösungen in den Bereichen Energie, Mobilität, Umweltmonitoring und Wohnungswirtschaft getestet, evaluiert und perspektivisch skaliert werden. Eine Applikation zur Anzeige aktueller Sensormesswerte, zur Visualisierung historischer Daten sowie zur täglichen Generierung von Reports per E-Mail wird erstellt.

LoRaWAN-Technologie

LoRaWAN ist ein Funkstandard für drahtlose Netzwerke, der kleine Datenmengen über große Distanzen bei sehr geringem Energieverbrauch überträgt und vor allem im Bereich des Internets der Dinge (IoT) Anwendung findet. Die Technologie ermöglicht Reichweiten von etwa 2 bis 20 Kilometern und eignet sich ideal für batteriebetriebene Sensoren und Aktoren, deren Batterien oft bis zu zehn Jahre halten können. Geräte und Gateways sind kostengünstig, der Standard ist offen, und pro Gateway können sehr viele Geräte betrieben werden. Weitere Vorteile eines LoRaWAN-Netzwerks sind die gute Durchdringung von Gebäuden und Kellern, die hohe Sicherheit durch Ende-zu-Ende-Verschlüsselung sowie die geringe Strahlenbelastung.

Ausbau der LoRaWAN-Infrastruktur

Mit Gateways und leistungsfähigen Antennen wurde in Freiberg eine solide LoRaWAN-Infrastruktur aufgebaut. Mithilfe eines autark über Solarpanels betriebenen LoRaWAN-

Gateways (Abb. 1) konnte bereits eine gute Funkabdeckung in Freiberg und der Umgebung erzielt werden (Abb. 2). Gleichzeitig wurden bestehende „Funklöcher“, insbesondere im Innenstadtbereich, identifiziert.



Abb. 1: Autarkes LoRaWAN-Gateway (Milesight SG50) mit leistungsstarker 9-dBi-Stubantenne (INBM – TUBAF Freiberg)

Das Gateway Milesight SG50 [1] ist auf einen vollständig autarken Betrieb ausgelegt und kann ohne lokale Netzwerk- und Energieinfrastruktur betrieben werden. Es kombiniert ein kompaktes LoRaWAN-Gateway mit LTE-Anbindung, Akku und Solarpanel und ermöglicht damit die Erweiterung des LoRaWAN-Netzes auch an abgelegene oder infrastrukturell schwer erschließbare Orte. Der integrierte Akku erlaubt zudem einen mehrtägigen Betrieb auch bei fehlender Sonneneinstrahlung.

Das Gateway wurde über einen Zeitraum von sechs Monaten unter realen Außenbedingungen betrieben. Auf diese Weise konnten sowohl die Eignung für den autarken Dauerbetrieb als auch die Robustheit des Systems im praktischen Einsatz nachgewiesen werden. Lediglich im Januar kam es bei länger anhaltender fehlender Sonneneinstrahlung zu Ausfällen von ein bis zwei Tagen. Die Sensoren senden sonst zuverlässig Daten aus dem Stadtgebiet sowie aus den Randbereichen an das Gateway.

Dabei können auch Entfernungen von mehreren Kilometern überbrückt werden (Abb.3). In der dicht bebauten Innenstadt zeigen sich jedoch vereinzelt Versorgungslücken.



Abb. 2: Karte (Heatmap) mit Gateways in Freiberg und Umgebung sowie der der Empfangsstärke

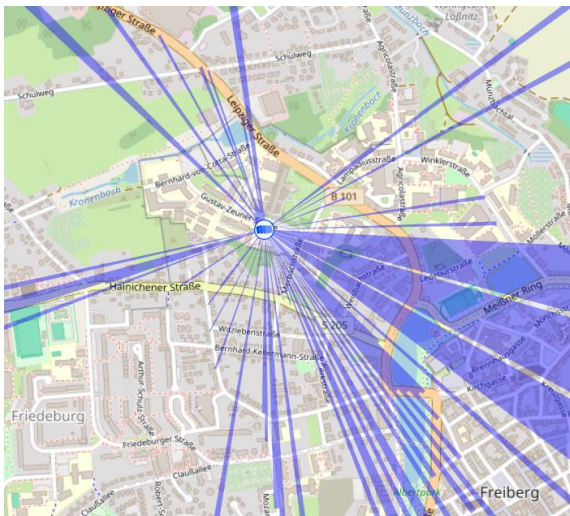


Abb. 3: Visualisierung des Datenaustauschs zwischen Sensoren und Gateway

Durch die Installation weiterer Gateways an ausgewählten, exponierten Standorten oder markanten Gebäuden, beispielsweise auf dem ca. 40 m hohen Bibliotheksturm, kann die Funkabdeckung und Redundanz weiter verbessert werden. Perspektivisch wird dadurch eine nahezu lückenlose Integration von Sensoren in Freiberg und Umgebung ermöglicht.

Integrierter Multisensor-Lösungen

Eine integrierte Multisensor-Infrastruktur zur Übertragung, Speicherung, Visualisierung und Analyse von Sensordaten wurde entwickelt (Abb.4). Als technische Grundlage wurde MQTT als IoT-Messagesystem ausgewählt. Dafür wurden eine Topic-Struktur zur Datenzuordnung und Sensorsteuerung sowie eine JSON-Dokumentstruktur für Sensordaten definiert.

Die Lösung wurde in einer Cloud-Umgebung auf einem IONOS-Server umgesetzt. IONOS ist eine Europäische Gesellschaft (SE) und Anbieter für Webhosting- und Cloud-Lösungen. Anschließend wurden ein MQTT-Server mit Mosquitto sowie eine Datenbank mit MS SQL Server konfiguriert und in Betrieb genommen. Darüber hinaus wurde eine Applikation erstellt, die aktuelle Sensormesswerte anzeigt, historische Daten visualisiert und täglich Reports per E-Mail (Abb.5) generiert. Zur Validierung der implementierten Lösung wurde die Integration verschiedener Sensoren und Sensorsysteme demonstriert.

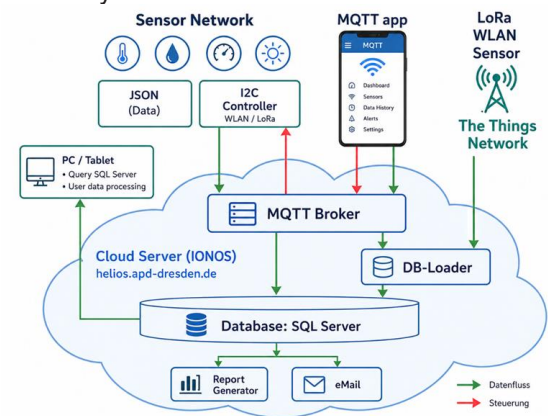


Abb. 4: Integrierten Multisensor-Infrastruktur

Das Kernstück der entwickelten Lösung ist einerseits eine Datenbank, in der alle Dokumente der Sensoren zur Datenerhebung und Sensorsteuerung persistiert werden und andererseits das MQTT Message System, welches die gezielte Verteilung und Zustellung der Dokumente mittels eines „publish-subscribe“ Verfahrens gewährleistet. Jede Komponente (Sensoren, Smartphon App, PC-Analyse Applikation, Überwachungs- und Alarmsystem, DatenLogger, etc) kann sich am MQTT-Broker anmelden und sich für die jeweiligen Datenströme und Control-Kommandos unter den entsprechenden Topics selektiv registrieren. Der DB-Loader registriert sich („subscribe“) für alle Topics und stellt so sicher, dass alle über das Netzwerk verbreiteten Datenpakete historisiert und für einen Abruf zur Analyse und Visualisierung historischer Daten verfügbar sind.

Um das entwickelte System hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit unter vielfältigen Nutzungsbedingungen zu entwickeln und zu testen wurden in großem Umfang und in großer Variabilität eigenentwickelte und kommerzielle Sensoren integriert. Bis zum April 2026 sind in der Datenbank 160 Mio. Datensätze mit einem Gesamtspeicherplatz von 64GB eingelaufen. Für effiziente Abfragen großer Datenmengen wurden Indizes auf Kombinationen aus Zeitstempel und Topic-Struktur eingerichtet. Insgesamt entstand damit eine skalierbare Plattform, über die unterschiedliche Sensoren und Sensorsysteme integriert, gesteuert, historisiert, mobil angezeigt und gezielt ausgewertet werden können.

Sensoren

Kommerzielle Sensoren wurden sowohl in den Laboren des Instituts für Nanoskalige und Biobasierte Materialien als auch auf dem Campus der TUBAF installiert. Sie erfassen unter anderem Temperatur, Luftfeuchtigkeit, CO₂-Konzentration, Lichtintensität und Luftdruck.

Darüber hinaus wurden selbst entwickelte Multisensoren als autarke Sensorboxen für den mobilen Einsatz konzipiert. Diese dienen als flexible Messstationen zur Erfassung verschiedener Umweltdaten. Neben Temperatur und Luftfeuchtigkeit wurden auch Halbleiter-Gassensor-Arrays sowie GPS-Sensoren erfolgreich integriert (Abb. 5).



Abb. 5: Autarkes mobiles Multisensorbox

Erfassung und Darstellung der Messwerte

Die Sensordaten wurden über den MQTT-Server von The Things Network für LoRaWAN erfasst. Pro Tag werden 72 Dokumente generiert, da alle 20 Minuten ein Datenpaket erzeugt und archiviert wird. Die Sensoren senden seit mehreren Monaten stabil Messdaten an die Sensorplattform. Von dort aus werden täglich Reports mit Messwertdiagrammen erstellt, archiviert und per E-Mail versendet (Abb.6-7).

Abb.6 zeigt beispielhaft einen automatisch generierten Tagesreport, der per E-Mail versendet wird und den Verlauf der Datenaufzeichnung über die jeweils letzten sieben Tage darstellt. Neben den Messwerten des Drucksensors, der seit April 2024 bereits fast drei Millionen Datensätze geliefert hat, sind auch die Messwerte von zwei unterschiedlichen Temperatursensoren dargestellt. Alle erfassten Sensordaten können in beliebiger Kombination und für verschiedene Zeiträume frei als Report konfiguriert werden.

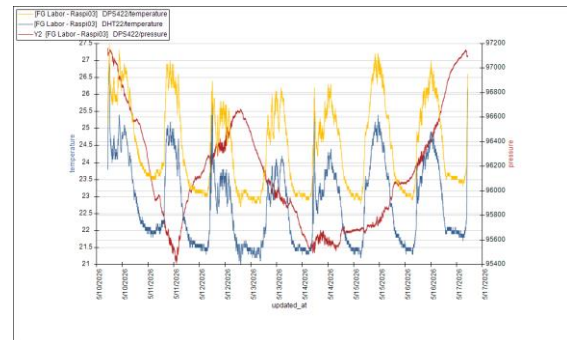


Abb. 6: Täglich fortlaufender Email-Report-Chart der Temperatur- und Luftdruckwerte

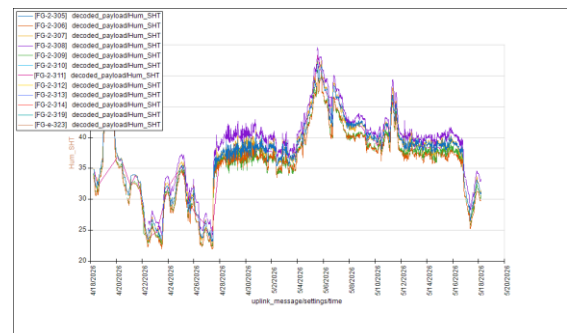


Abb. 7: Täglich fortlaufender Email-Report-Chart der Luftfeuchtigkeit in Laboren

Diese Darstellungen verdeutlichen die Funktionsweise des entwickelten Gesamtsystems. Der Sensor wird unter Nutzung der empfohlenen Technologien und Spezifikationen über LoRaWAN integriert. Ab diesem Zeitpunkt sind alle Datensätze online auf mobilen Geräten verfügbar, werden in der Cloud gespeichert, als Verlaufsdigramme dargestellt und können in zyklisch, beispielsweise täglich oder wöchentlich, automatisch generierte E-Mail-Reports aufgenommen werden. Darüber hinaus stehen sie für individuelle Analysen und Weiterverarbeitungen per Datenbankabfrage zur Verfügung.

Auswertung der Messwerte

Aus den JSON-Dokumenten werden stündliche Mittelwerte für Temperatur, Luftfeuchtigkeit, RSSI (Received Signal Strength Indicator) und SNR (Signal-to-Noise Ratio) extrahiert.

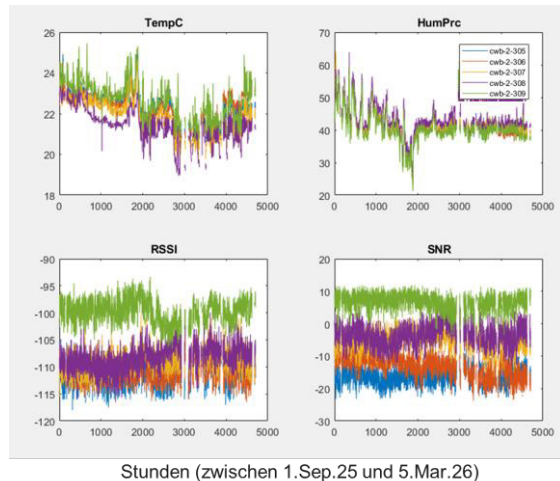


Abb. 8: stündliche Mittelwerte für Temperatur, Luftfeuchtigkeit, RSSI (Received Signal Strength Indicator) und SNR (Signal-to-Noise Ratio) zwischen 1.Sept 25 und 5.März 26

Die Abb.9 zeigt, wie die erfassten Sensordaten für die weitere Analyse in einer vierdimensionalen Matrix, also einem Tensor, strukturiert werden.

Datenrepräsentation als 4-D-Matrix (Tensor)

- 4-D-Tensor(5,24,7,28) für Temp, Luftfeuchtigkeit, rssi, snr
- enthält teilweise fehlende Werte (2.309 / 23.520) ~ 10%



Abb. 9: Datenrepräsentation als 4-D-Matrix (Tensor) mit den Dimensionen Sensor, Tagesstunde, Wochentag und Kalenderwoche.

Für fünf Sensoren, 24 Stunden, sieben Wochentage und 28 Kalenderwochen ergibt sich eine strukturierte Datenbasis mit 23.520 möglichen Datenpunkten pro Messgröße. Diese Struktur wird für Temperatur, Luftfeuchtigkeit, RSSI und SNR verwendet. Aufgrund fehlender oder nicht übertragener Datenpakete enthält der Datensatz teilweise Lücken; im Beispiel fehlen 2.309 Werte, was etwa 10 % entspricht.

Die Varianzkomponentenanalyse des Tensors mit vier Dimensionen zeigt, dass Umweltgrößen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit hauptsächlich durch langfristige wöchentliche Veränderungen geprägt sind, während Kommunikationsgrößen wie RSSI und SNR vor allem durch sensor- bzw. standortabhängige Unterschiede bestimmt werden.

Tab. 1: Wichtigste Einflussdimensionen der einzelnen Messgrößen aus der Varianzkomponentenanalyse

Messgröße	wichtigste Dimension	Interpretation
TempC	Kalenderwo.	saisonaler Verlauf / langfristige Temperaturänderung
HumPrc	Kalenderwo	saisonale oder wetterbedingte Feuchteänderung
RSSI	Sensor	standortabhängige Signalstärke
SNR	Sensor	starke Unterschiede der Signalqualität zwischen Sensoren

Die Methode Principal Component Analysis (PCA) mittels Singular Value Decomposition (SVD) wurde verwendet, um die Messgrößen des Sensorgitters in ihre wichtigsten Muster zu zerlegen (Abb 10 und 11).

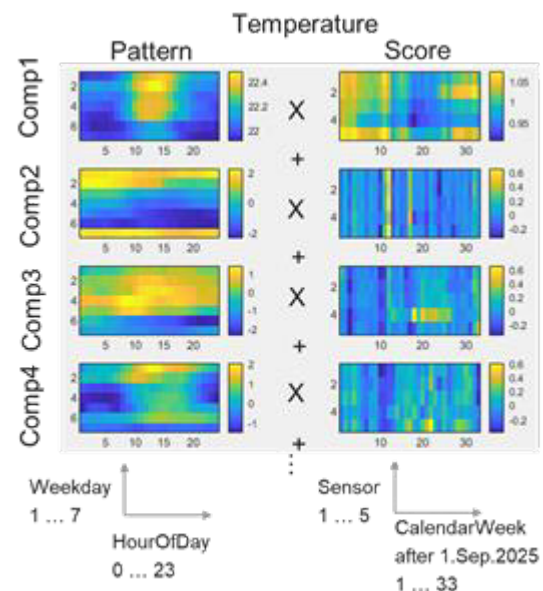


Abb. 10: PCA/SVD-Zerlegung der Temperaturdaten eines Sensorgitters bestehend aus 5 Sensoren.

Die Messdaten hängen hier von Stunde des Tages: 0–23 ; Wochentag: 1–7 ;Sensor: 1–5 Kalenderwoche: 1–33 nach dem 1. September 2025 ab.

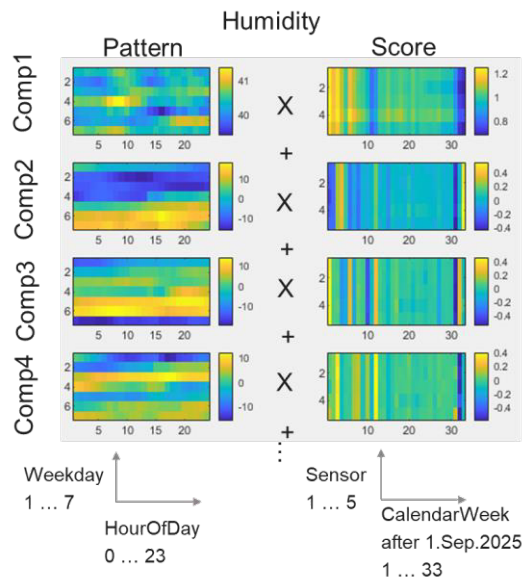


Abb. 11: PCA/SVD-Zerlegung der Luftfeuchtigkeitsdaten eines Sensorgitters.

Die PCA versucht, diese komplexen Daten in wenige einfache Bausteine zu zerlegen. Für jede Hauptkomponente (Comp1–Comp4) wird ein zeitliches Muster („Pattern“) über die Stunde des Tages und den Wochentag mit einem räumlich-zeitlichen Gewicht („Score“) über Sensoren und Kalenderwochen kombiniert. Bei den Temperaturdaten zeigt sich ein klarer Tagesrhythmus. Insgesamt wird die Temperaturvariabilität stark durch den Tag-Nacht-Rhythmus, bestimmt.

Bei der Luftfeuchtigkeit (Abb.11) zeigt sich ein anderes Bild. Die erste Hauptkomponente beschreibt ein relativ stabiles Grundniveau der Feuchte, jedoch ohne stark ausgeprägten Tagesgang. Auffällig ist, dass die Luftfeuchtigkeit stärker von langfristigen Wetterlagen, saisonalen Effekten und episodischen Ereignissen beeinflusst wird als von der Tageszeit. Im Gegensatz zur Temperatur ist der diurnale Zyklus hier deutlich schwächer ausgeprägt.

Die Kommunikationsparameter RSSI (Empfangssignalstärke in Dezibel) (Abb. 12 und SNR (Signal-Rausch-Verhältnis) (Abb. 13.) werden hauptsächlich durch sensorstandortspezifische Unterschiede bestimmt. Dies weist darauf hin, dass Faktoren wie Sensorposition, Distanz zum Gateway, Abschattung durch Wände oder lokale Interferenzen die Verbindungsqualität dominieren, während zeitliche Effekte vergleichsweise schwach ausgeprägt sind.

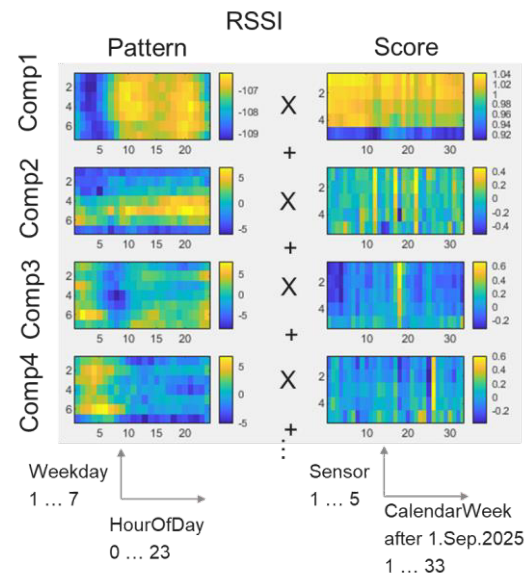


Abb. 12: PCA/SVD-Zerlegung der Empfangssignalstärke (RSSI)

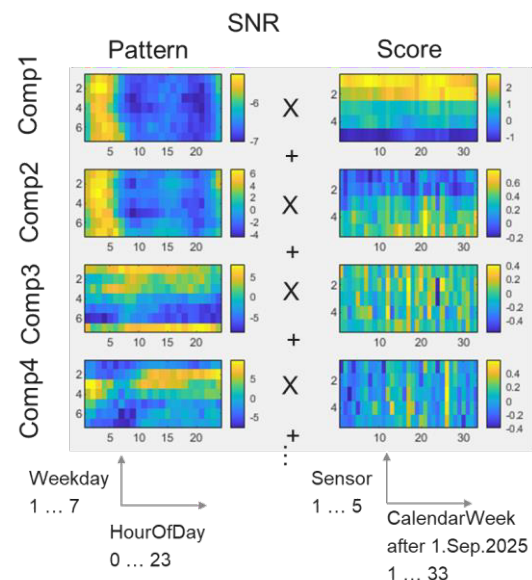


Abb. 13: PCA/SVD-Zerlegung des Signal-Rausch-Verhältnisses

Die Methode (PCA) mittels (SVD) ermöglicht es, dominante Muster zu identifizieren, Unterschiede zwischen Sensoren sichtbar zu machen und saisonale/wetterbedingte und räumliche/sensortechnische Veränderungen kompakt darzustellen. Dadurch können komplexe Sensordaten effizient interpretiert und charakteristische Umweltprozesse erkannt werden.

Literaturnachweis

- [1] A. Möcker, Milesight SG50: Solarbetriebenes LoRaWAN-Gateway im Test, c't 21/2024 S. 94