

ECC 2026 Vortrag Arendi AG

Grenzen von 2.4 GHz im IoT – und wie Sub-GHz sie überwindet.

arendi
WE ARE YOUR SOLUTION



Thomas Rupp
Elektroingenieur HTL, Geschäftsführer

Agenda

1

AUSGANGSLAGE: INDOOR IOT FUNK

Typische Gebäude
Anforderungen

2

2.4GHZ IN DER PRAXIS – WO SIND DIE GRENZEN?

Mesh-Abhängigkeit
Interferenzen / Dichte
Begrenzte Durchdringung

3

SUB-GHZ ALS ALTERNATIVE

Bessere Durchdringung
Regulierung / Duty Cycle /
Länderunterschiede

4

TECHNOLOGIEN IM VERGLEICH

2.4 GHz vs Sub-GHz

5

PRAXISTEST IM BÜROGEBÄUDE

Setup & Methodik
Ergebnisse
Erkenntnisse

6

FAZIT & SYSTEMDESIGN

wann 2.4 GHz sinnvoll ist
wann Sub-GHz klar überlegen ist

Wer ist Arendi

- KMU, Spezialisiert auf **Embedded Systems, Funktechnologien** und **IoT**
- Entwicklung von Hardware, Firmware und Software für vernetzte Geräte
- Hohe Expertise in der Entwicklung von Funklösungen wie Bluetooth, Sub-GHz, Wi-Fi, Thread, LTE, NFC, proprietäre Funklösungen
- End-to-End Engineering -> Von Konzept & Design über Prototyping bis zur Serienreife
- Branchenvielfalt -> Industrie, Medizintechnik, Gebäude Automation, Consumer Electronics
- Standort & Team -> Sitz in Hombrechtikon (ZH), interdisziplinäres Team mit über 20-jähriger Praxiserfahrung
- Wir machen jedes Jahr die coolste Weihnachtskarte ☺



Indoor IoT Funkkommunikation - Ausgangslage

Typische Umgebung: -> **Bürogebäude, Wohnraum, Fabrikhallen**



Was ist charakteristisch:

- Gebäude mit kleinen und grossen Räumen
- Räume sind durch verschiedenen Materialien getrennt (Gipskarton, Mauerwerk, Beton, Glas, Holz)
- Mehrere Stockwerke, meist durch armierten Beton getrennt

Indoor IoT Funkkommunikation – Typische Praxisanforderungen für IoT Nodes

- **Robust** gegenüber Störungen in der Luft
- Ausreichende **Reichweite**
- **Stromsparend** da oft Batteriebetrieben
- **Vernünftiger Datendurchsatz** da oft mehr als nur Telemetrie-daten gebraucht werden (Digital Twin Konzept, Firmware Update over the Air, Reaktionszeit/Latenzen für Remote-Konfiguration über die Cloud
toll: >500kbit/s
noch ok 50kbit/s)
- **Günstige** Hardware Kosten
- **Zulassungsfähig** in den Zielländern



Indoor IoT Funkkommunikation – 2.4GHz

Es gibt heute diverse standardisierte und gut etablierte 2.4GHz Wireless Technologien (Bluetooth, ZigBee, Thread) welche diese Kriterien dank Mesh Erweiterung erfüllen.

Diese liegen im 2.4GHz ISM Band weil:

- Es ist **lizenzfrei**
- Einziges Band welches **Weltweit** ohne Restriktionen nutzbar ist!
- Die maximal abgestrahlte Leistung überall bei **+10dBm** liegt, typischerweise wird aber mit 0dBm gearbeitet

Die Praxiserfahrung zeigt jedoch:

Ohne Mesh und einer hohen Anzahl Routing Devices ist die Funkreichweite Indoor durch die schlechte Durchdringung, die Limitierung der Sendeleistung bei der hohen Nutzdichte des Bandes für viele Use Cases nicht ausreichend

Indoor IoT Funkkommunikation – Ist Sub-Giga die Lösung?

Sub Giga Technologien bei 400 oder 800 MHz versprechen im Vergleich zu 2.4GHz durch das tiefere Frequenzband massiv **bessere Durchdringung** und höhere **Reichweiten**.

Es gibt dafür andere Limitierungen:

- Das Subgiga Spektrum ist **weltweit unterschiedlich** reguliert, dies erhöht die Komplexität in der Hardware, Firmware und bei den Länderzulassungen
- Die **Sendeleistung** und die Spektrum Nutzung (Spezifisch der Duty Cycle) sind stark Länderabhängig reguliert, es resultieren massive **Unterschiede** beim **Datendurchsatz** und den **Funkreichweiten**
- Die Nutzung des 868MHz Bandes ist spezielle in **Europa restriktiv sehr** in Vergleich mit anderen Ländern, dies macht Sub-Giga Technologien generell in Europa weniger interessant (Duty Cycle und Sendeleistung Restriktionen in Europa)

Es stellt sich die Frage:

Sind Sub-Giga Technologien trotz der Europäischen Restriktionen die "bessere" Alternative für Indoor IoT Anwendungen?

Indoor IoT Funkkommunikation – Technologieoptionen (Standards)

LoRaWAN[®]

Wi SUN

Wi Fi[™]
HaLow

nr+ dect
wireless technology

zigbee

THREAD

Bluetooth[®]

2.4 GHz

800 MHz

Vergleich der typischen “standardisierten” Funktechnologien

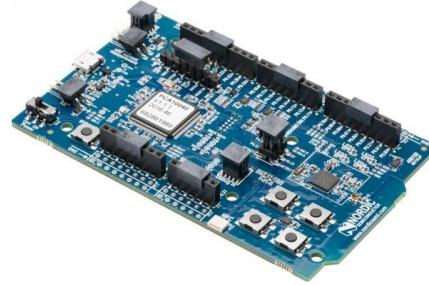
Technologie	Frequenzband	Reichweite (Indoor/Outdoor)	Datendurchsatz	Stromverbrauch / Energieprofil	Sendeleistung Europa	MAC (EU)	Typische Kosten (Chip/Modul)
Bluetooth LE	2,4 GHz ISM	10–30 m / <100 m	125 kbps – 2 Mbps	Sehr niedrig (μ A im Sleep, mA aktiv)	10dBm	40 1MHz breite Kanäle, FHSS ohne LBT	Chip: 0.5–3 € / Modul: 1.5–6 €
Wi-Fi (klassisch)	2,4 / 5 / 6 GHz	30 m / 50 m (Indoor), <100 m Outdoor	Bis 9,6 Gbps (Wi-Fi 6), real <1 Gbps	Hoch (Router: 5–15 W, Client: 100–300 mA)	20dBm (2.4GHz), 23dBm (5GHz)	20-40MHz breite Kanäle, 4 Kanäle	Modul: 1.5 – 10 €
Thread	2,4 GHz (IEEE 802.15.4)	10–30 m pro Hop (Mesh)	~250 kbps	Sehr niedrig (optimiert für Batteriebetrieb)	10dBm	16 Kanäle, LBT (CSMA/CA), 2MHz Bandbreite, kein Hopping (DSSS), aber Kanalwechsel bei dauerhafter Belegung	Chip: 1.2–4 € / Modul: 3–12 €
Zigbee	2,4 GHz	10–30 m pro Hop (Mesh)	~250 kbps	Sehr niedrig (ähnlich Thread)	10dBm	16 Kanäle, LBT (CSMA/CA), 2MHz Bandbreite, kein Hopping (DSSS), aber Kanalwechsel bei dauerhafter Belegung	Chip: 1.2–4 € / Modul: 3–12 €
DECT NR+	1,9 GHz	30–50 m Indoor / bis 300 m Outdoor	Mehrere Mbps (bis ~10 Mbps)	Effizient, aber höher als LPWAN	24dBm	10 Carrier Frequenzen (Kanalbandbreite 1.728MHz), 24 Kanäle mit 10ms Slots, LPT	Modul: 10–25 €
LoRaWAN	EU868 MHz	Indoor: 50–500 m / Outdoor: 2–15 km	0,3–50 kbps	Extrem niedrig (Jahre Batterielaufzeit)	14dBm	3+5 Kanäle, 125kHz Bandbreite, 1% Duty Cycle, ALOHA und Frequenzagilität	Modul: 8–15 €
Wi-Fi HaLow	863–868 MHz (EU)	100 m – 300m (Indoor), bis 6 km Outdoor	150 kbps – 78 Mbps	Niedriger als klassisches Wi-Fi (TWT für Energiesparen)	14dBm	LBT, DSSS, fixe 2.8% Duty Cycle	Modul: 10–20 €
Wi-SUN	Sub-GHz (868 MHz EU)	500 m – mehrere km (Mesh)	50 kbps – 200 kbps	Niedrig (Mesh, IPv6, FHSS)	14dBm	LBT und FHSS, es gilt die 100s/h pro 200kHz Bandbreite Regel -> 2.8% Duty Cycle pro Kanal, > 36 Kanäle -> 100% Duty Cycle max	Chip: 3.2–12 €

Vergleichsmessung in echtem Bürogebäude - Subgiga zu 2.4GHz

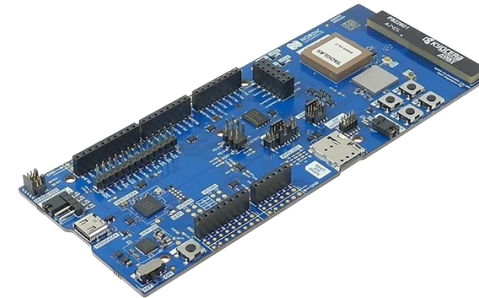
- Der Vergleich soll die Funkperformance (hauptsächlich Reichweite) betrachten
- Als geeigneten Subgiga Technologien werden Wi-SUN und WiFi HaLow ausgewählt, LORA WAN sehen wir wegen dem limitierten Datendurchsatz als weniger geeignet für Indoor IoT
- Die Subgiga Messung wird nur mit **Wi-SUN** gemacht, die Messergebnisse von WiFi HaLow sind aber vergleichbar
- Im 2.4GHz Bereich wird mit einem **Bluetooth LE** Setup getestet, da die Reichweiten (für einen Hop) mit Thread und ZigBee vergleichbar sind (sind typischerweise auch die gleichen Radios für alle Technologien)
- Zusätzlich haben wir **DECT NR+** noch im Vergleich integriert, da diese Technologie mit Sendeleistung und dem geschützten 1.9GHz Band das Durchdringungs-Defizit wett machen könnte

Testequiment für Vergleichsmessung

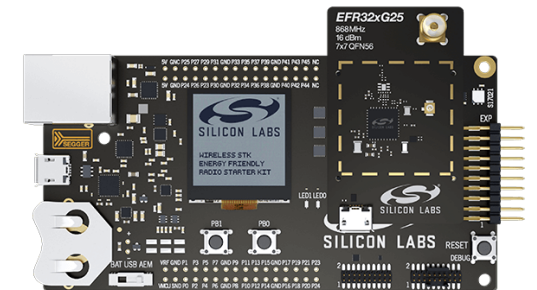
- Bluetooth LE -> Nordic NRF52-DK



- DECT NR+ -> Nordic nRF9151-DK



- Wi-SUN -> Silabs WI-SUN-PK6015A



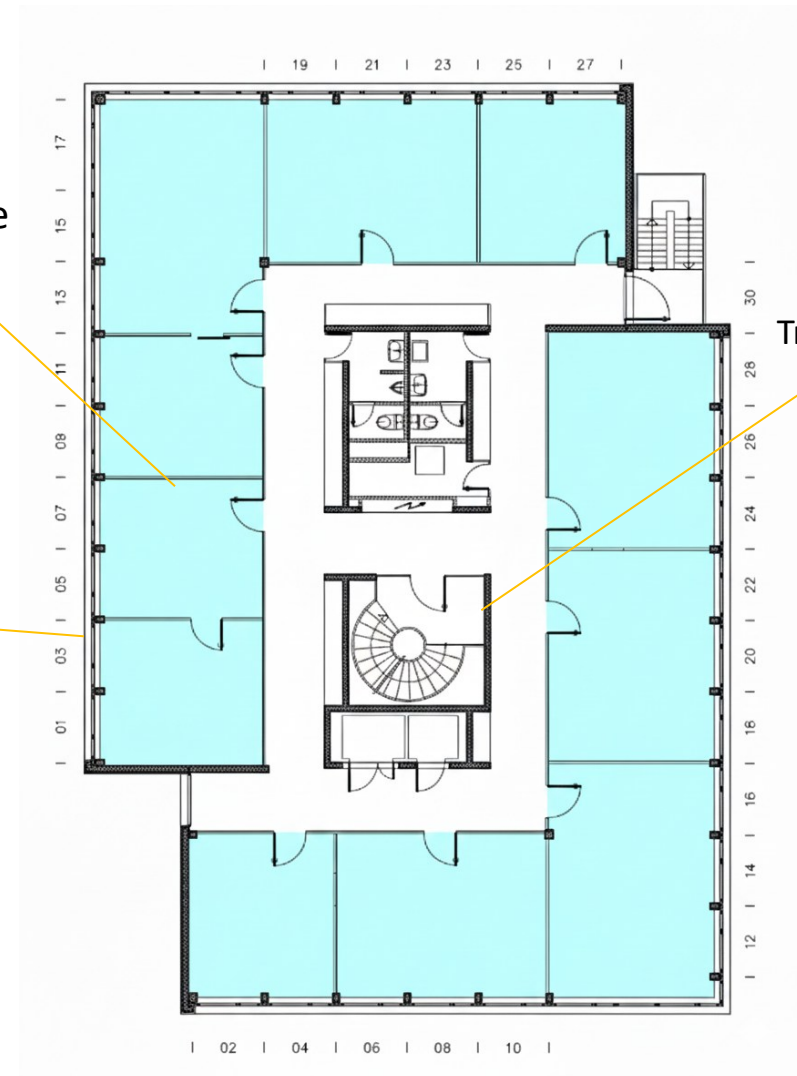
Test-Ort (Arendi Standort, Oak Central) - Bürogebäude, 7 Stockwerke



Mauerwerk

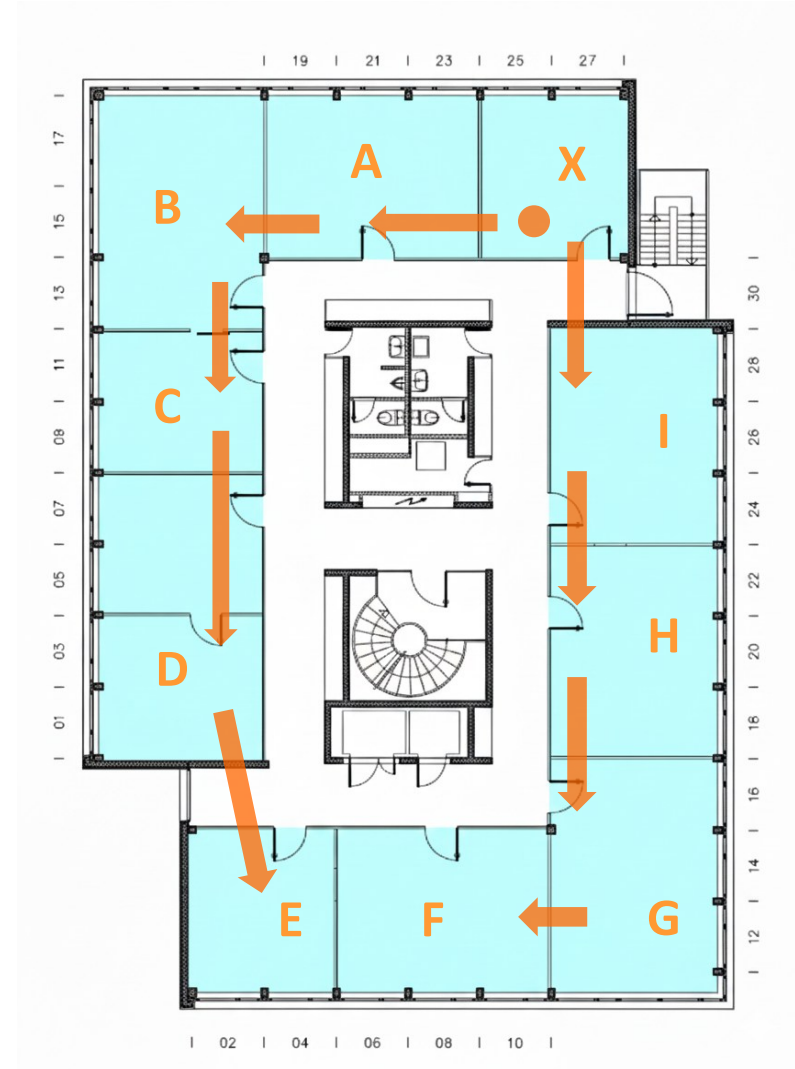
Gipskarton
Zwischenwände

Treppenhaus Beton



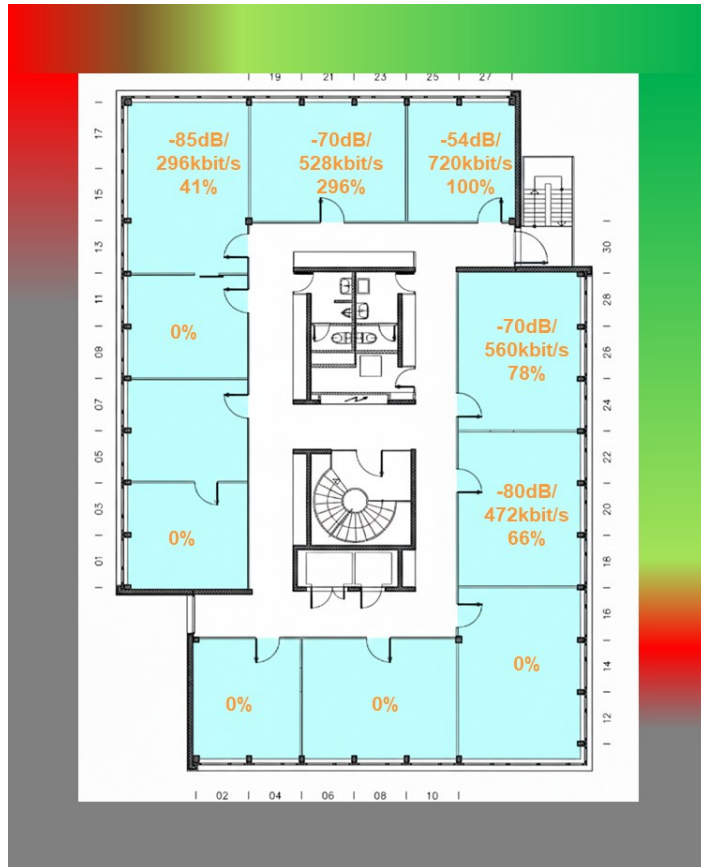
Messungen (Büroabdeckung) im Stock 4 - Vorgehen

- Start im Raum X
- Messung in beide Richtungen in allen Räumen auf dem Stockwerk

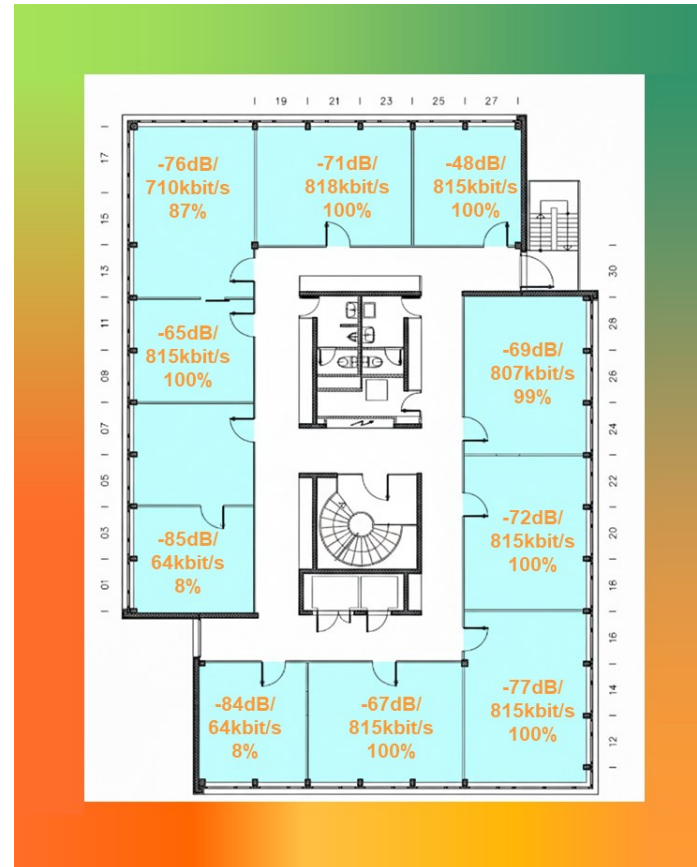


Messungen (Büroabdeckung) im Stock 4 - Messresultate

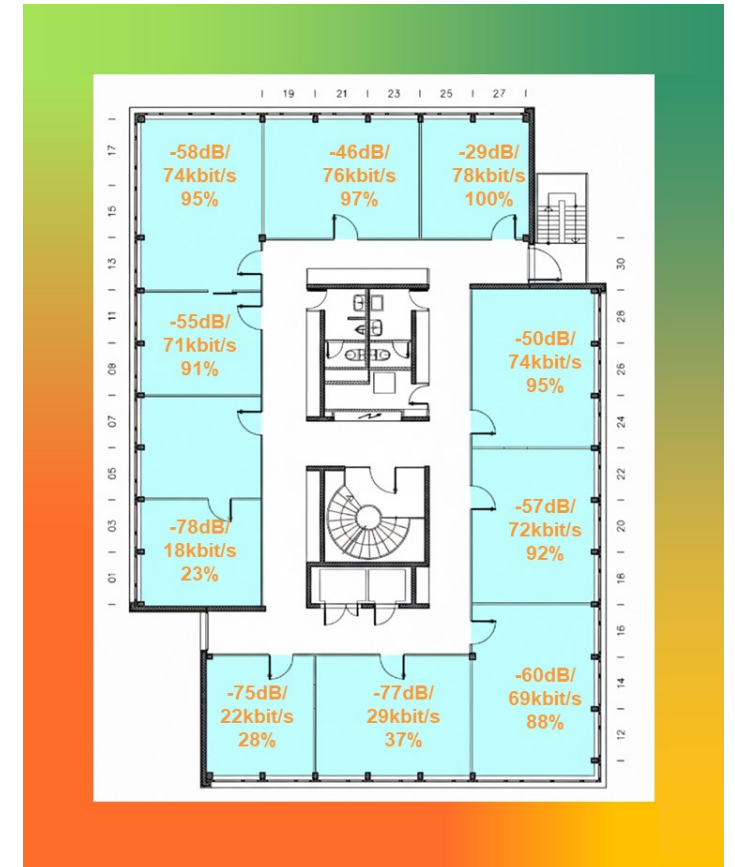
2.4GHz / Bluetooth LE / 0dBm



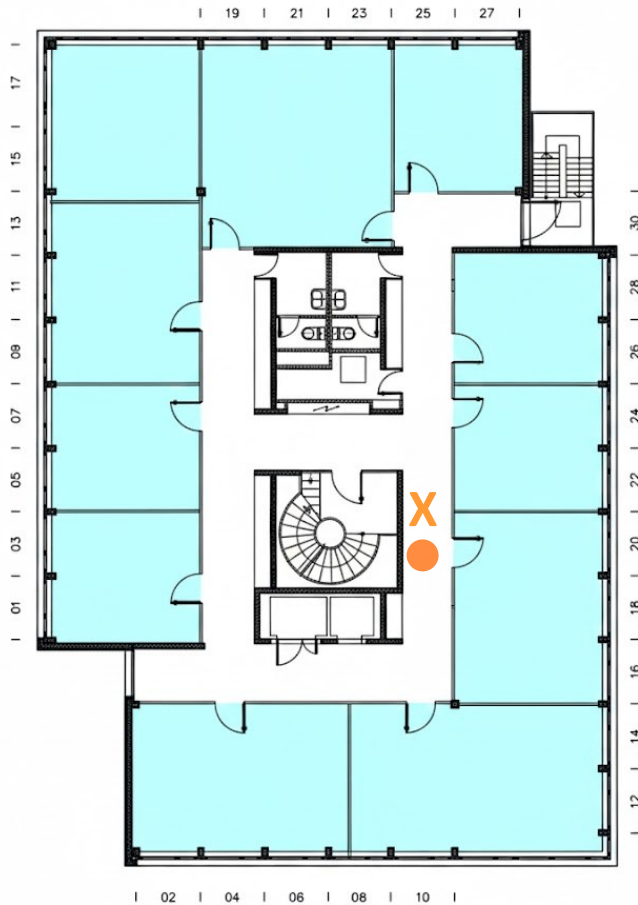
1.9GHz / DECT NR+ / 19dBm



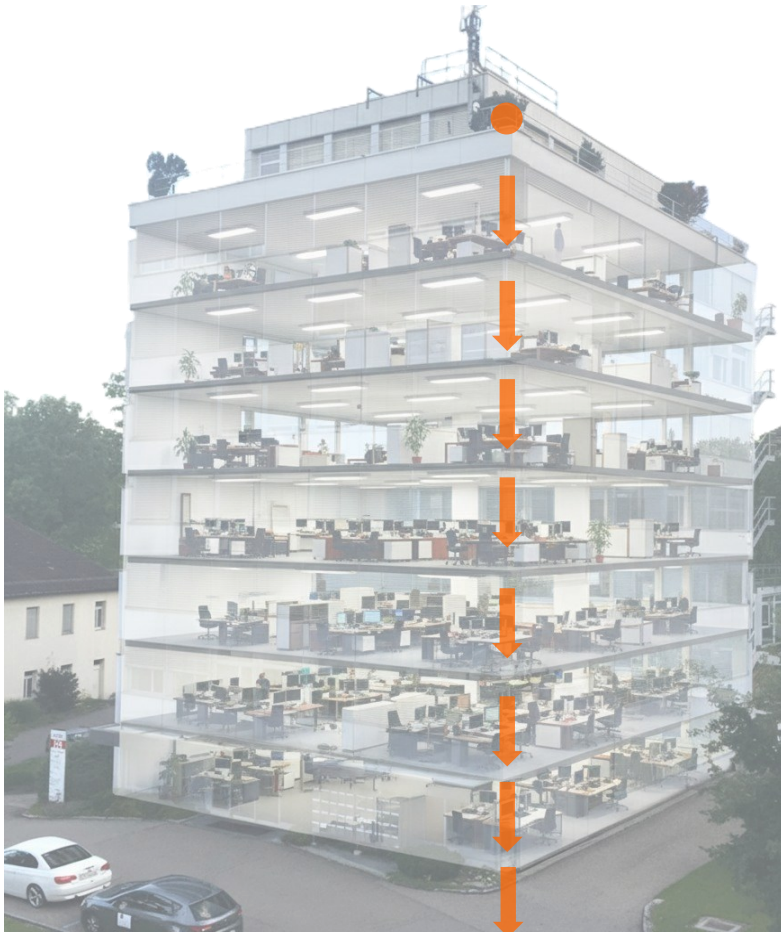
868MHz / Wi-SUN / 14dBm



Messung (Abdeckung) über Stockwerke - Vorgehen



Messung (Abdeckung) über Stockwerke – Messresultate: 2.4GHz / Bluetooth LE / 0dBm

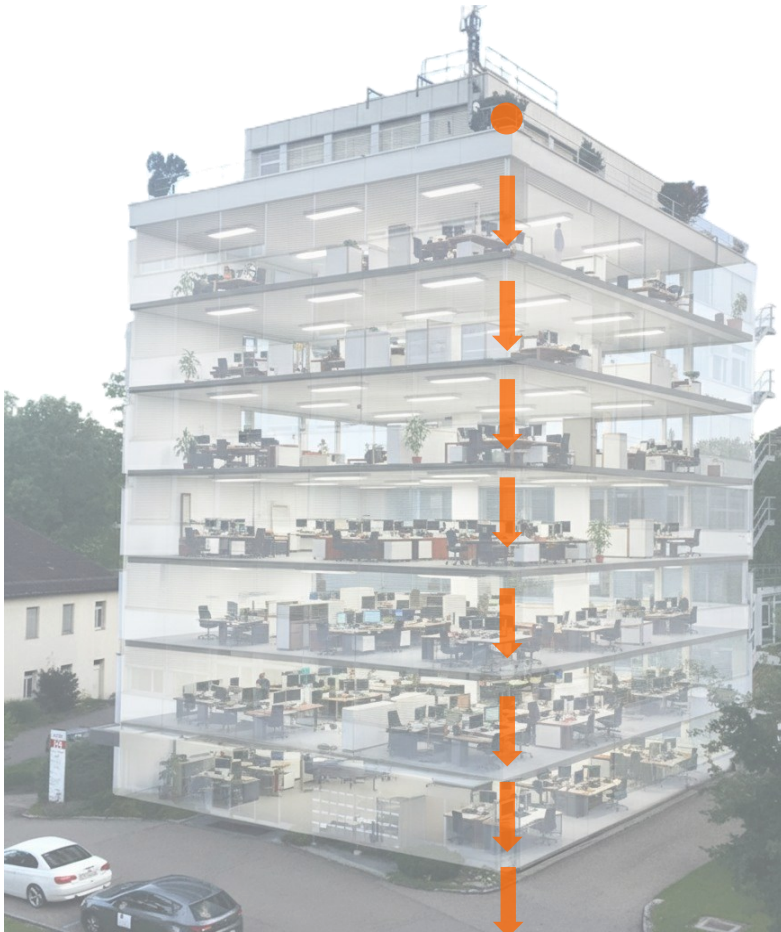


X: -55dB / 760kbit/s / 100%

S6: -78dB / 416kbit/s / 58%



Messung (Abdeckung) über Stockwerke – Messresultate: 1.9GHz / DECT NR+ / 19dBm



X: -55dB / 75kbit/s / 100%

S6: 57dB / 64kbit/s / 85%

S5: -83dB / 64kbit/s / 85%

S4: -84dB / 64kbit/s / 85%

S3: -90dB / 50kbit/s / 67%

S2: -97dB / 13kbit/s / 17%

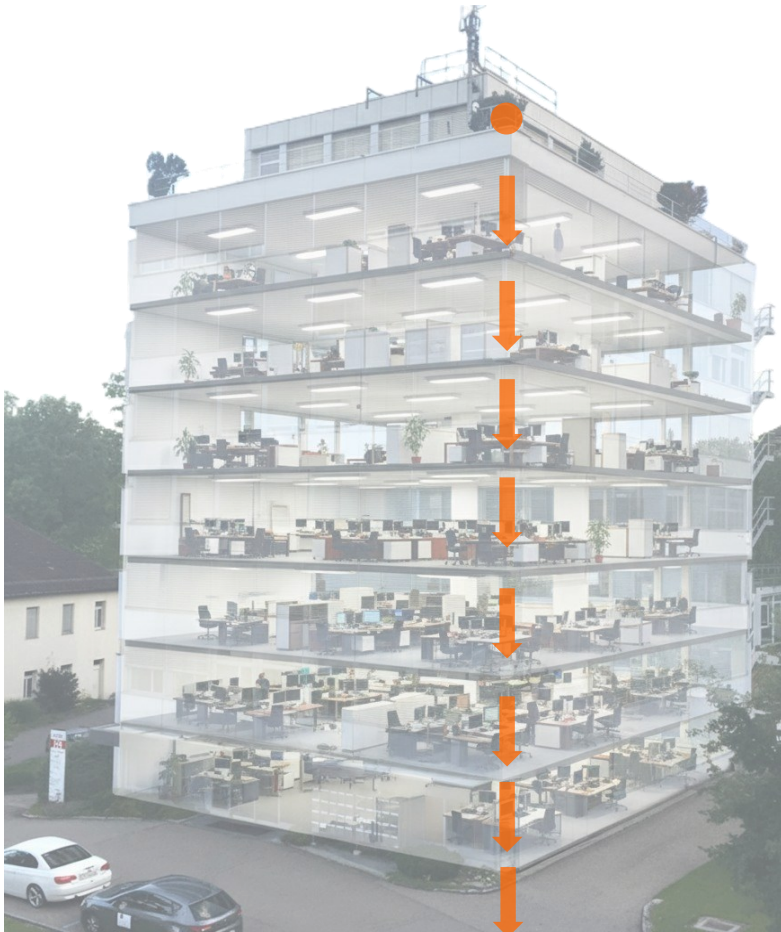
S1: -03dB / 64kbit/s / 85%

S0: -97dB / 64kbit/s / 85%

K: -102dB / 2kbit/s / 3%



Messung (Abdeckung) über Stockwerke – Messresultate: 868MHz / Wi-SUN / 14dBm



X: -32dB / 77kbit/s / 100%

S6: -47dB / 76kbit/s / 99%

S5: -58dB / 75kbit/s / 97%

S4: -64dB / 77kbit/s / 100%

S3: -72dB / 72kbit/s / 94%

S2: -73dB / 69kbit/s / 90%

S1: -79dB / 67kbit/s / 87%

S0: -85dB / 60kbit/s / 78%

K: -96dB / 14kbit/s / 18%



Vergleichsmessung - Fazit

- 2.4GHz mit 0 dBm Sendeleistung -> überwinden von 1 Raum und 1 Stockwerk
- 1.9GHz mit 19dBm (max wären 24dBm) -> Ganzer Stock und ganzes Gebäude abgedeckt
- 868MHz mit 14dBm -> Ganzer Stock und ganzes Gebäude abgedeckt
- Die bessere Durchdringung im Subgiga Bereich kompensiert einiges an Sendeleistung im Gebäude

Die 14-dBm-Limite und die Duty Cycle Einschränkungen für Sub-GHz in Europa sind zwar einschränkend, doch die Messresultate zeigen trotzdem eine massiv bessere Abdeckung als mit 2.4 GHz.

Standardisiertes Sub-Giga hat damit im Bereich Indoor IoT Funkvernetzung einen deutlichen Vorteil wenn es darum geht robuste Lösungen mit keinen oder nur wenigen Mesh-Hops aufzubauen.

Betrachten wir Wi-SUN und WiFi HaLow



Was hat Arendi mit den zwei Technologien am Hut?

- Mit Wi-SUN arbeiten wir in einem Kundenprojekt auf Basis Silicon Labs Chipsets und Stacks
- Mit WiFi HaLow beschäftigen wir uns seit ein paar Jahren und unterstützen in dieser Zeit die IG-WiFi-HaLow welche probierte, Arbeiten bei Hochschulen zu platzieren.
- Seit Sommer 2025 arbeiten wir mit ZHAW an einem Innoscheck Projekt, wo eine WiFi HaLow Entwicklungs- und Evaluationsplattform auf ESP32 Basis entwickelt wird, die als günstige WiFi/WiFi HaLow/Bluetooth Hardware eingesetzt werden kann, z.B. für kostengünstige IoT Gateways.



Technischer Überblick – WiFi Halo



- Ist ein IEEE Standard: 802.11ah, WiFi Alliance
- IP-native, hohe Datenrate. USA bis zu 40 Mbps, EU mit 1MHz Kanalbandbreite bei 2Mbit
- Chiphersteller: Morse Micro (MM6108, MM8108), Newracom (NRC7292, NRC7394)
- Modulhersteller: Quectel (FGH100M-H), Seeed Studio, Jinhong Tech
- Software / Stackhersteller (mit Wi-Fi Alliance Zertifizierung): SDKs von Morse Micro, Newracom
- Spektrum Nutzung Europa: 863–868 MHz, Duty Cycle: STA 2,8 %, AP 10 %, nutzt LBT hat aber kein FHSS, bis 14dBm
- Datenraten: 2MB/s, ohne FHSS ist aber 2.8% duty cycle einzuhalten (long term data rate 200kb/s)

Technischer Überblick – Wi-SUN



- Basiert auf IEEE 802.15.4g (PHY) und 802.15.4e (MAC)
- Standardisierung durch Wi-SUN Alliance (entstanden aus Smart-Grid-Initiative USA)
- IP-native, bietet Routing- und self-healing Mesh mit moderaten Datenraten 50-200kbit/s
- Chiphersteller: Texas Instruments (CC1312R, CC1352P), Silicon Labs (EFR32FG), STMicroelectronics (S2-LP), Renesas (RX-Serie)
- Software und Stack Hersteller: TI Wi-SUN Stack, Silicon Labs Wi-SUN SDK, Renesas Wi-SUN FAN Stack
- Modulhersteller: Digi International (XBee Wi-SUN), Advantech, Radiocrafts
- Spektrum Nutzung Europa: 868 MHz ISM, 14dBm, Duty Cycle: 100s/h Regel (2.8%), unterstützt LBT/FHSS
- Datenraten: 50-200kbit/s, duty cycle Limit wird durch LBT/FHSS faktisch aufgehoben da mehr als 36 Hoppingkanäle vorhanden sind

Zusammenfassung zu Wi-SUN und WiFi HaLow

- Beide **eignen** sich hervorragend für **Indoor Projekte** um die Reichweitenlimitation im 2.4GHz Bereich zu umgehen
- Beide sind in **vielen Länderregionen** etabliert, technisch ausgereift, durch die Limitationen in Europa aber noch wenig verbreitet bei uns
- Wi-SUN hat Vorteile im Bereich **Chiphersteller** und **Chippreise**, zudem bietet es native **Mesh** um damit kostengünstig grosse Funknetzwerke aufbauen zu können
- WiFi HaLow bietet hingegen grosse Vorteile im Bereich **Datendurchsatz**

Kernaussage – was kann ich mitnehmen?

«Im realen Gebäude übertrifft Sub-GHz die Reichweite von 2.4 GHz deutlich – trotz beschränkter Sendeleistung und regulatorischer Limits.»

«Mit Sub-GHz ersetzt man viele Mesh-Knoten durch Physik»

«Mit WiFi Halo und Wi-SUN bekommt man robuste und etablierte Sub-GHz Technologien für die Produktentwicklung von Funknetzten»



Fragen?

Schauen sie doch an unserem Stand vorbei...

arendi
WE ARE YOUR SOLUTION

Arendi AG

Eichtalstrasse 55, 8634 Hombrechtikon, Schweiz

<https://www.arendi.ch>

info@arendi.ch