

IoT Vernetzung mit Wi-Fi HaLow

Embedded Computing Conference 2025, 27.05.2025, Winterthur

Luciano Sarperi, ZHAW, Institute of Signal Processing and Wireless Communications

- **Einführung Wi-Fi HaLow**
- **Regulatorisches**
- **Labormessungen**
- **Performance in der Praxis**
- **Zusammenfassung**

Einführung Wifi HaLow (IEEE 802.11ah)

Typische Anwendung: IoT

Protokoll: IP-Konnektivität (wie bei standard Wi-Fi)

Datenrate: 150 kbit/s bis 78 Mbit/s

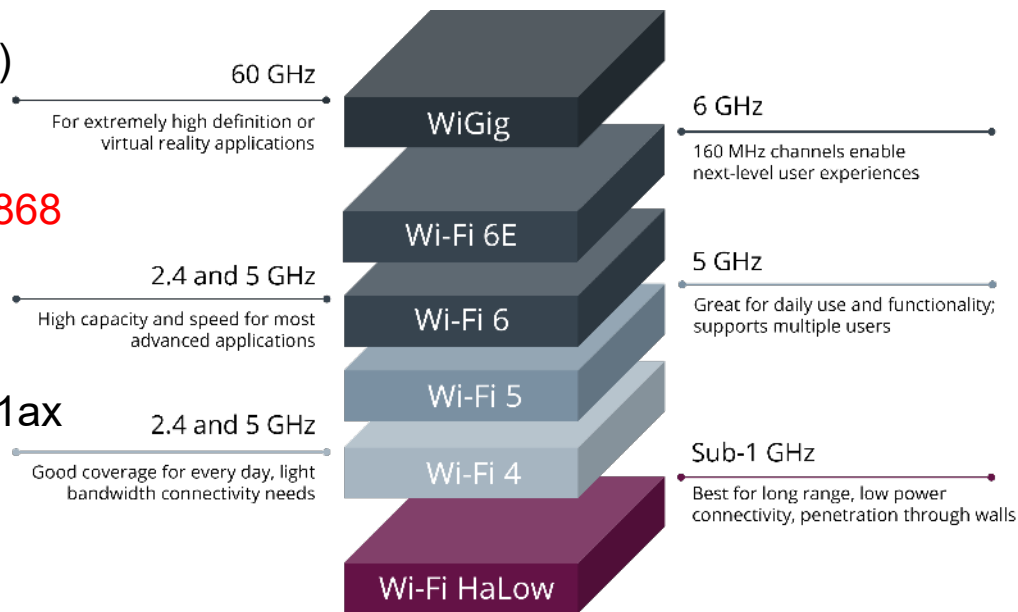
Bandbreite: 1 MHz, 2 MHz, optional: bis 16 MHz, 868 MHz band (EU)

Energiesparmechanismen

- Target Wake Time (TWT), wurde in Wifi 6 802.11ax übernommen
- Restricted Access Window (RAW)
- Traffic Indication Map (TIM) segmentation

Reichweite: Grösser als bei standard Wi-Fi

- Potenziell doppelte Reichweite bei 863 MHz im Vergleich zu 2.4 GHz bei gleichem Pfadloss



Reproduziert mit freundlicher Genehmigung von Wi-Fi Alliance

Regulatorische Einschränkungen (CH)

Relevante BAKOM Radio Interface Regulations (RIRs): [RIR1003-11](#) (STA), [RIR1003-12](#) (AP)

Parameter	Anforderung
Frequenzbereich	863 MHz...868 MHz
Kanalbandbreite	0.6 MHz... 1 MHz
Abgestrahlte Leistung P_{TX}	ERP ≤ 14 dBm (≤ 25 mW) , auf Dipol referenziert $EIRP ≤ 16.1$ dBm, auf omni-direktionalen Strahler referenziert
Duty-cycle $D = T_{TX} / T_{Total}$ (1h observation window)	RIR1003-12 (Acces Point): ≤ 10 % , polite spectrum access ¹ RIR1003-11 (Station): ≤ 2.8 % , polite spectrum access ¹
Frequency planning assumptions	EN 300 220-1, ab 01.01.2026 EN 304 220-1 und EN 304 220-2 in RIR1003-11 und RIR1003-12 vorgesehen

¹ EN 300 220-1: Polite spectrum access = Listen Before Talk (LBT), optional mit Adaptive Frequency Agility (AFA). Der CSMA/CA Algorithmus von 802.11 entspricht prinzipiell der LBT Funktion.

Wifi HaLow Module für Europa / CH

US-Markt

- Viele Module und Produkte für US-Markt vorgesehen (Frequenzbereich 902 MHz...928 MHz, keine duty-cycle Einschränkung)

Europäischer / CH Markt

- Wenige Produkte mit CE-Zertifizierung



Newracom WHM500A SoC mit NRC7394
Leistungsaufnahme TX: 630 mW (nur Radio)



Morse Micro MM8102 angekündigt
Leistungsaufnahme TX: 310 mW

Leistungsaufnahme TX des Nordic Semiconductor "IoT" standard Wi-Fi IC

- 690mW (2.4 GHz-Band)
- 940 mW (5 GHz-Band)

Newracom NRC7394 Wifi HaLow SoC

Integrierter SoC NRC7394

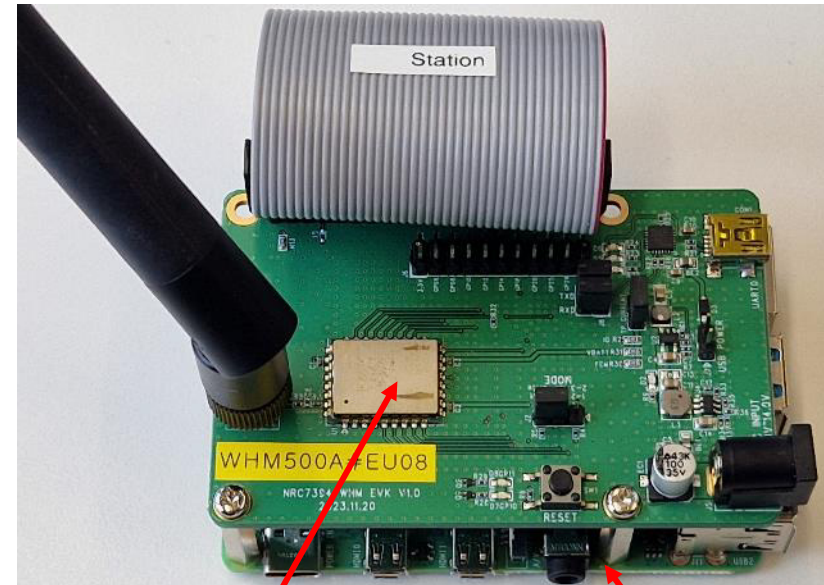
- Baseband (MAC & PHY) 802.11ah
- Sub-GHz Radio, $P_{TX\ max} = 17\ \text{dBm}$
- Embedded Cortex-M3 ARM® processor
- ADC/DAC (analog Interface für externe Komponenten) und I/Os

Kanalbandbreite: 1, 2 and 4 MHz

Testkonfiguration

- **863.5 MHz** (Kanal 36) mit 1 MHz Bandbreite
- $P_{TX\ max} = 14\ \text{dBm}$

CE Zertifizierung: **WHM500A Modul** mit dem NRC7394, Flash Memory und HF-Filter **ist CE zertifiziert** und erfüllt gemäss Newracom ETSI EN300 220 LBT+AFA



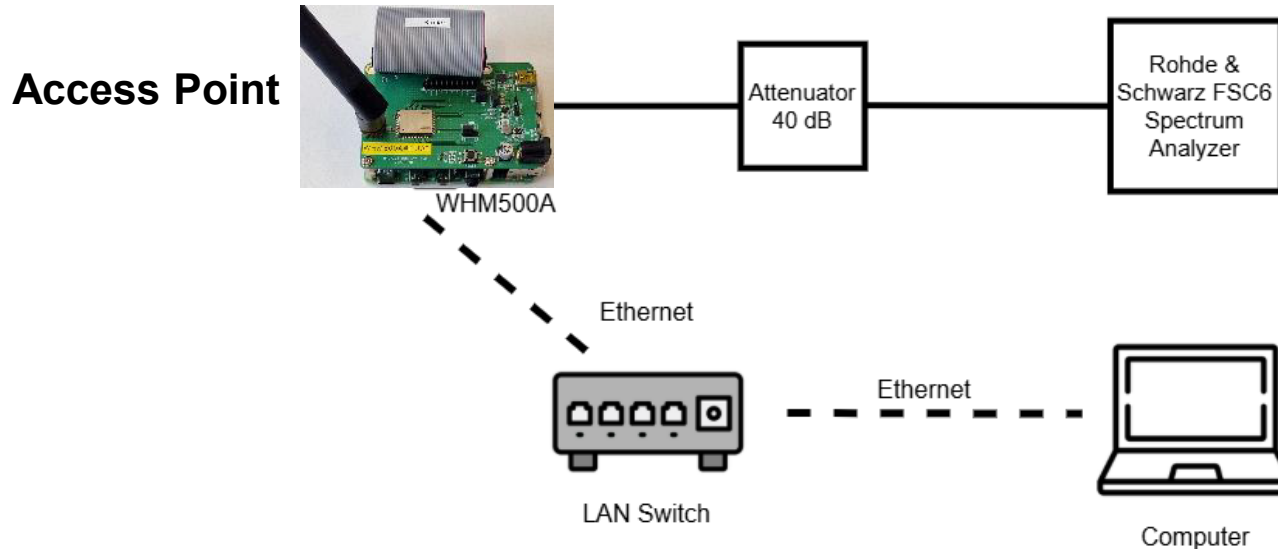
WHM500A Modul

Raspberry Pi 4B

Messung Sendeleistung und Spektrum

Konfiguration

- WHM500A sendet **Beacon Frames** als Access Point (AP)
- **Sendeleistung in Kanalbandbreite von 1 MHz bestimmt**
(max. hold with RMS detector)



Messung Sendeleistung und Spektrum

Messergebnisse

- Sendeleistung:
 $P_{TX\ meas} = -23.9\ \text{dBm} + 40\ \text{dB} = 16.1\ \text{dBm}$
- Erfüllt knapp 16.1 dBm EIRP Limite wenn omnidirektionale Antenne ohne Gain verwendet wird ($G_{ant} = 0\ \text{dBi}$)
- Beobachtung: Kurzzeitig um 2...3 dB höhere Sendeleistung zu Beginn des Beacon Frames

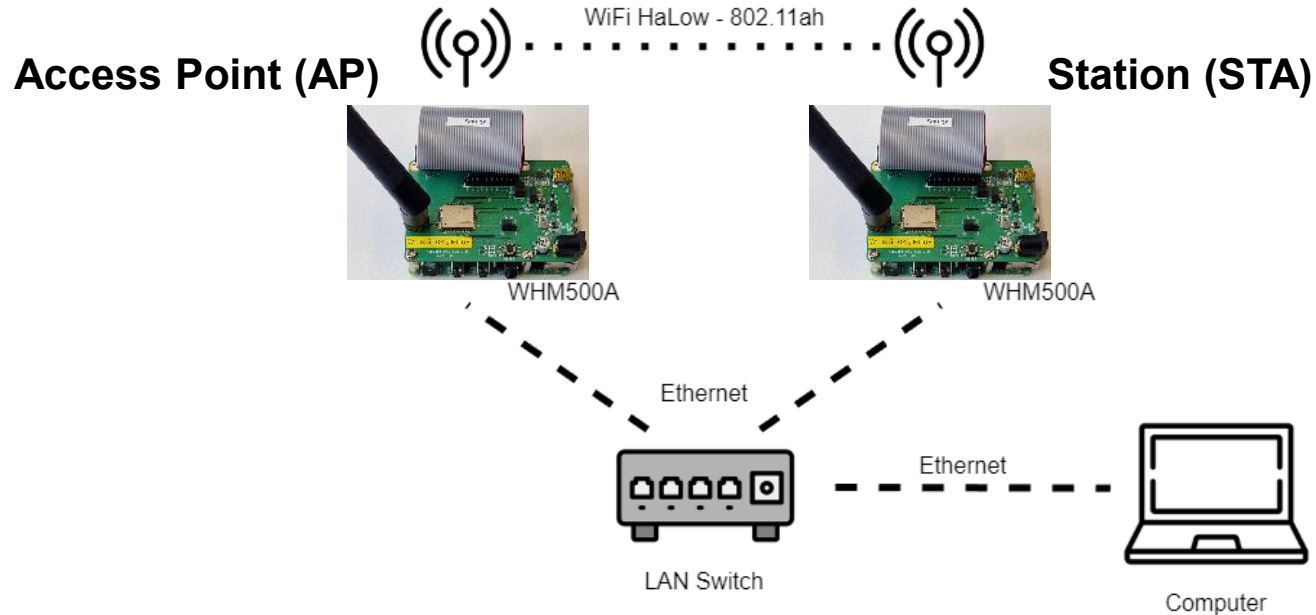


Quelle: ZHAW ISC

Messung Duty-Cycle Überwachung und Limitierung

Konfiguration

- Um Messung zu vereinfachen, **Duty-Cycle Beobachtungsintervall im WHM500A auf 1 s und 600 s gesetzt**
- **Mit Beacons und Datenverkehr** (mit iPerf erzeugt) getestet



Messung Duty-Cycle: Datenverkehr

Messergebnisse

Konfiguration WHM500A	Throughput STA → AP (Duty-Cycle Limite D = 2.8 %)	Throughput AP → STA (Duty-Cycle Limite D = 10 %)
Duty cycle Limitierung aus	1.82 Mbit/s	1.95 Mbit/s
Duty Cycle Limitierung ein, Beobachtungsintervall 1 s	41.7 kBit/s (entspricht 2.3 % von 1.82 Mbit/s)	123 kBit/s (entspricht 6.3 % of 1.95 Mbit/s)
Duty Cycle Limitierung ein, Beobachtungsintervall 600 s	1.82 Mbit/s während 20s (entspricht 3.3 % der Zeit), dann 0 während 580s	1.95 Mbit/s während 55s (entspricht 9.2 % der Zeit), dann 0 während 545s

- Durchschnittlicher Durchsatz bei 1 s Beobachtungsintervall **erfüllt Limite von 2,8 % (STA) / 10 % (AP) → ok**, bei AP aber Duty-Cycle Limite nicht ausgenutzt
- Innerhalb eines Beobachtungsintervalls bricht Durchsatz nach ca. Duty-cycle Limite zusammen → **ok**, Duty-Cycle Limite bei STA aber leicht überschritten

Messung Duty-Cycle: Beacon Frames des Access Points

Messergebnisse

- Berechnung Duty-Cycle Beanspruchung durch Beacons (short beacon alle 100 ms)
 - **3.95 %** des zulässigen 10 % Duty-Cycles werden **durch Beacons "verbraucht"**
- Gemäss Newracom werden Beacons bei der Duty-Cycle Überwachung berücksichtigt
 - Anstelle des berechneten 3.95 % Duty-Cycle Verbrauchs durch Beacons **nur 2.5 % im WHM500A berücksichtigt (prüfung interner counter)**

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1	0.000000000	SeongjiI_f1:fa:82 (...)		802.11	135	S1G Beacon, Flags=...R...C, SSID=halow_demo
2	0.099017709	SeongjiI_f1:fa:82 (...)		802.11	65	S1G Beacon, Flags=...R.FTC
3	0.201347174	SeongjiI_f1:fa:82 (...)		802.11	65	S1G Beacon, Flags=...R.FTC
4	0.303803230	SeongjiI_f1:fa:82 (...)		802.11	65	S1G Beacon, Flags=...R.FTC
5	0.406164250	SeongjiI_f1:fa:82 (...)		802.11	65	S1G Beacon, Flags=...R.FTC
6	0.508576307	SeongjiI_f1:fa:82 (...)		802.11	65	S1G Beacon, Flags=...R.FTC
7	0.610928494	SeongjiI_f1:fa:82 (...)		802.11	65	S1G Beacon, Flags=...R.FTC
8	0.713368623	SeongjiI_f1:fa:82 (...)		802.11	65	S1G Beacon, Flags=...R.FTC
9	0.815773270	SeongjiI_f1:fa:82 (...)		802.11	65	S1G Beacon, Flags=...R.FTC
10	0.918164084	SeongjiI_f1:fa:82 (...)		802.11	65	S1G Beacon, Flags=...R.FTC
11	1.023885896	SeongjiI_f1:fa:82 (...)		802.11	135	S1G Beacon, Flags=...R...C, SSID=halow_demo
12	1.122959435	SeongjiI_f1:fa:82 (...)		802.11	65	S1G Beacon, Flags=...R.FTC

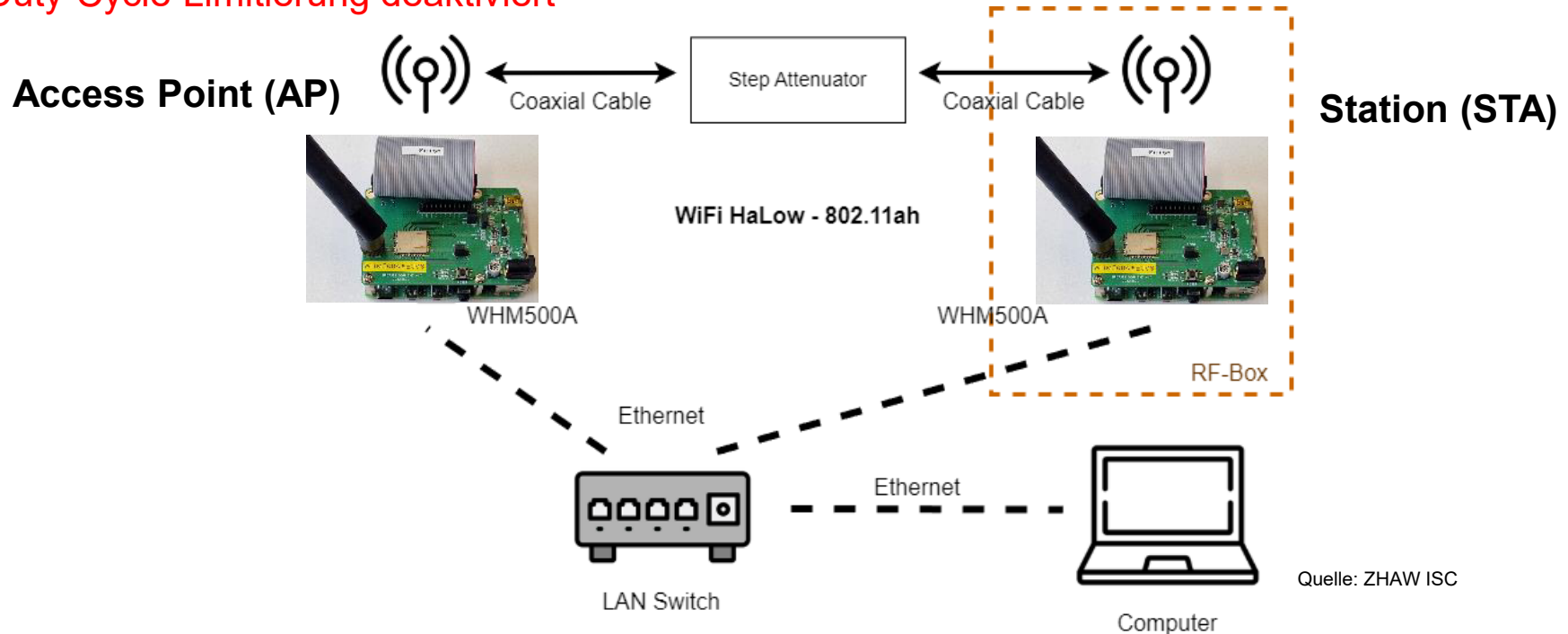
Full beacon every 1 s

Short beacons every 100 ms

Messung Empfängerempfindlichkeit und Datenrate im Labor

Konfiguration

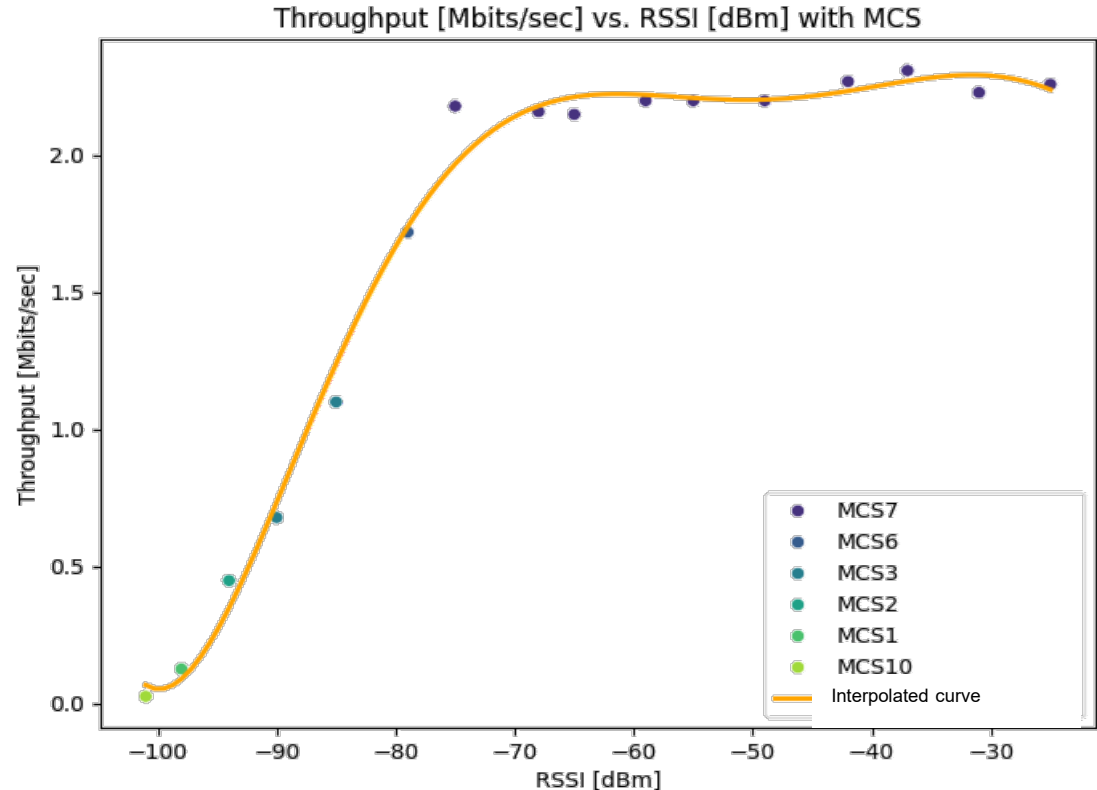
- Datenverkehr mit **iPerf** erzeugt
- **Duty-Cycle Limitierung deaktiviert**



Messung Empfängerempfindlichkeit und Datenrate im Labor

Messergebnisse

- Max. Datenrate: **2.3 Mbit/s** (theoretisch 3.0 Mbit/s¹) → ok, da Protokoll-Overhead und ACKs
- Empfängerempfindlichkeit $P_{RX\ min} = -101\ \text{dBm}$ (ähnlich zu anderen Untersuchungen^{2,3}) → ok



¹ Newracom, "NRC7394 Datasheet", Ver 1.3, Jan 22, 2024

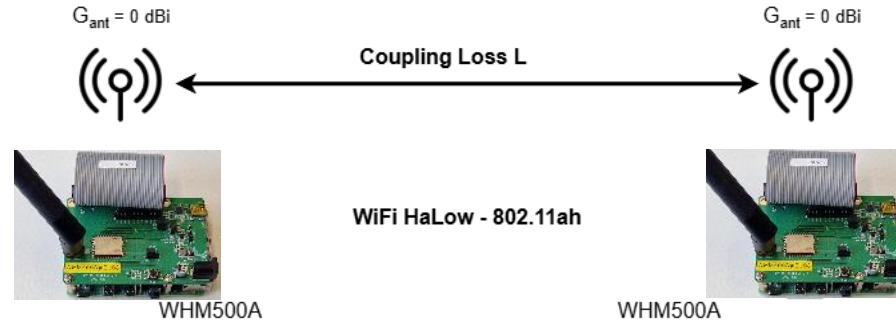
² S. Maudet et al, "Practical evaluation of Wi-Fi HaLow performance," in Internet of Things, Vol. 24, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100957>

³ F. Escobar, T. Raffoul, "Wi-Fi HaLow 802.11ah, Characterizing Wi-Fi HaLow for its use under Swiss Regulation", EPFL BSc Project, July 2024

Messung Empfängerempfindlichkeit und Datenrate im Labor

Reichweitenvergleich

- Wi-Fi HaLow aus Messung
- Wi-Fi 6 und LoRa Berechnet



Technologie	Maximaler Pfadloss $L = P_{TX\ max} - P_{RX\ min}$	Berechnete Reichweite im Aussenbereich ³
802.11ax (Wi-Fi 6) (2.4 GHz-band, 20 MHz BW)	$20 - (-85) = 105\ dB$ ¹	339 m
802.11ah (Wi-Fi HaLow) (868 MHz-band, 1 MHz BW)	$14 - (-101) = 115\ dB$	622 m
LoRa (868 MHz-band, 125 kHz BW)	$14 - (-138) = 152\ dB$ ²	5'853 m

¹ $P_{RX\ min}$ relativ zu gemessenem Wert von 802.11ah unter Berücksichtigung grösserer Bandbreite 802.11ax (20 MHz) und anderem tiefsten MCS Index (BPSK 1/2)

² ZHAW ISC, WCOM2 Vorlesung, Kapitel 8: "Applications of Chirp-Spread- Spectrum (CSS) Modulation"

³ Exponent-n Modell mit $n = 3.8$, $d_0 = 50\ m$, shadowing Reserve $X = 8.25\ dB$, Antennen-Gewinne $G_{ant} = 0\ dBi$

Messung Datendurchsatz in der Praxis

Konfiguration

- Datenverkehr mit **iPerf** erzeugt
- **Duty-Cycle Limitierung deaktiviert**
- Omni-direktionale Antennen mit 3 dBi Gewinn

Indoor



Quellen: ZHAW ISC

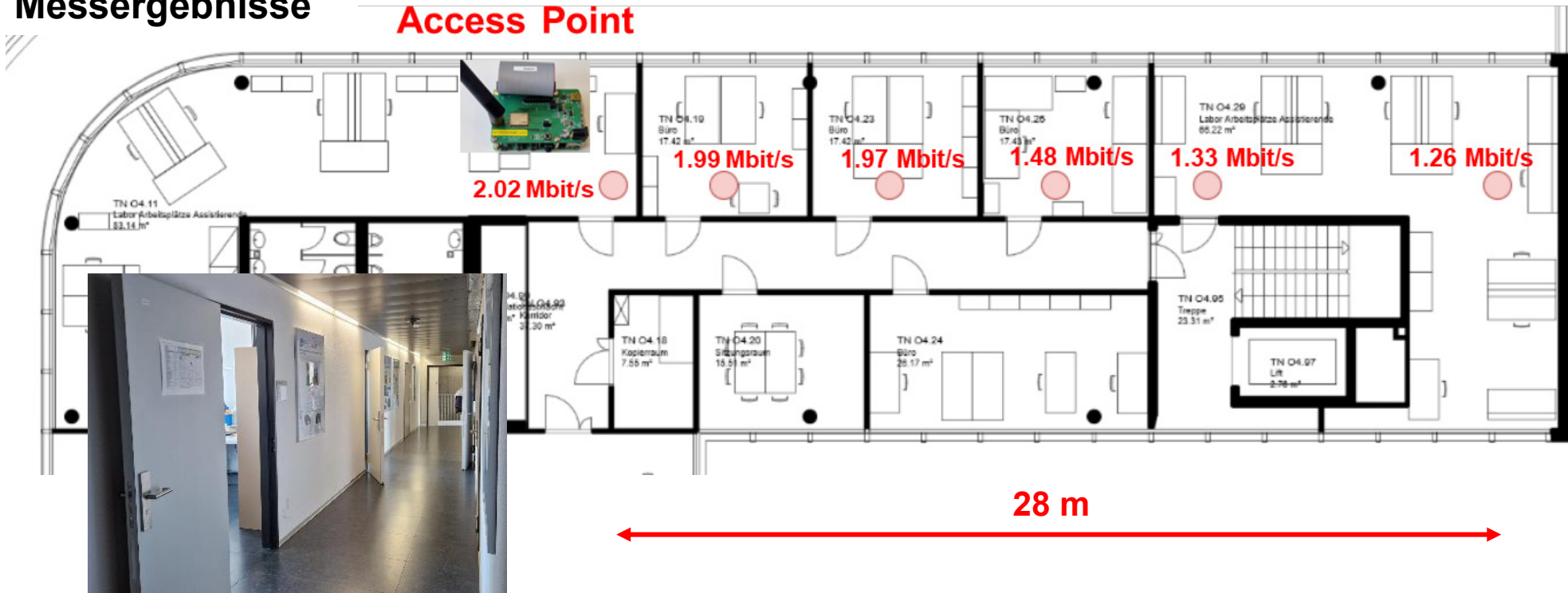
Aussenbereich



Messung Datendurchsatz in der Praxis: Indoor auf einem Stockwerk

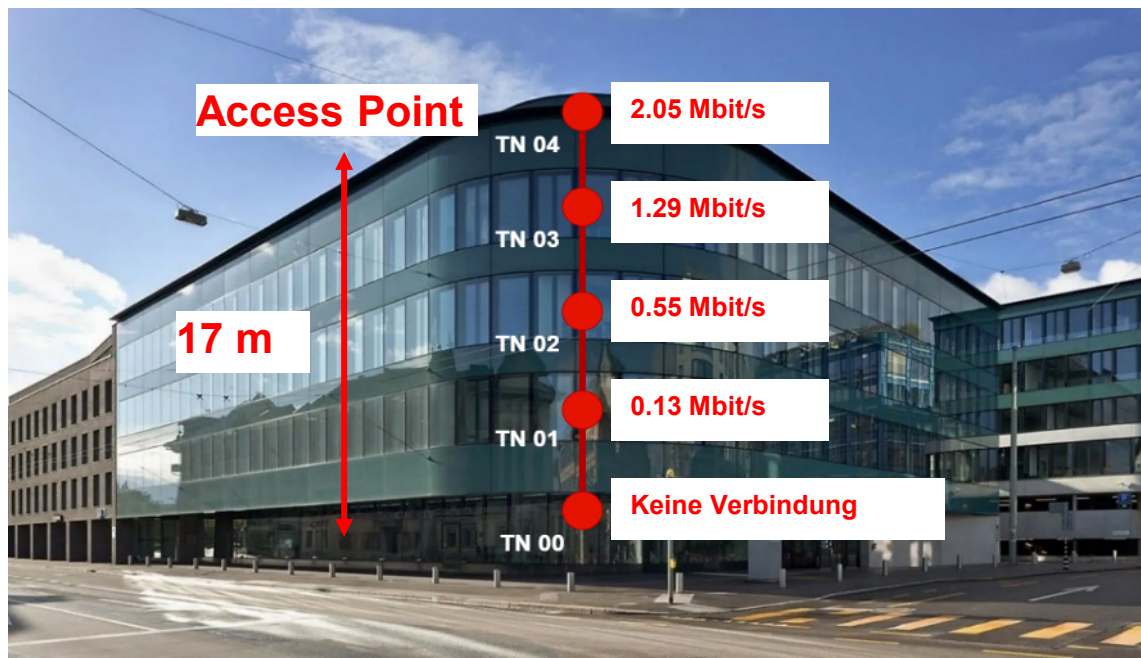
Messergebnisse

Access Point



Messung Datendurchsatz in der Praxis: Indoor über mehrere Stockwerke

Messergebnisse



- Datendurchsatz über 3 Stockwerke: **0.13 Mbit/s**
- Keine Verbindung über 4 Stockwerke

Messung Datendurchsatz in der Praxis: Aussenbereich

Messergebnisse



- Datendurchsatz bei **230 m Distanz: 0.11 Mbit/s**
- Keine Verbindung für grössere Distanzen

Zusammenfassung Wi-Fi HaLow Eigenschaften



- Maximaler Datendurchsatz $\approx 2.3 \text{ Mbit/s}$ wegen Bandbreitenbegrenzung auf 1 MHz
- Beacon frames können grossen Teil der 10 % Duty-Cycle Limite "verbrauchen"
→ Optimierung Beacon Intervall wichtig
- Sendeleistung des NRC7394/WHM500A kann Limite von 14 dBm ERP überschreiten wenn Antennengewinn $> 0 \text{ dBi}$
- Indoor **Netzabdeckung über 1...2 Stockwerke** möglich
- Outdoor **Netzabdeckung auf kleinerem Gelände** möglich (bis ca. 200 m)
- **Vergleich zu LoRa: Wesentlich höhere Datenrate und IP-Konnektivität, bi-direktionale Kommunikation, kleinere Reichweite**
- **Vergleich zu standard Wi-Fi: Tiefere Datenrate, grössere Reichweite**
- Ausblick: Vertiefte Untersuchung Newracom WHM500A und Morse Micro MM8102 (Innosuisse Innovationsscheck)

