NEXUS v4.3.0 – Methodendokumentation

System: NEXUS v4.3.0 (Hardware, Sensorik & Dämpfungsberechnung für die bioakustische Fledermausforschung)

Projektstatus: Validierungsphase (Jan. – Okt. 2026)

Autor: Jochen Roth, Paderborn (PaderBats)

DOI: 10.5281/zenodo.21570857

Stand: 7. Februar 2026 (Aktualisiert Oktober 2026)

Lizenz: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Ein Wort vorab: *Mein Name ist Jochen Roth und ich bin Maschinenschlosser aus Paderborn. Keine Uni, kein Biologiestudium. Aber seit Jahren beobachte ich Fledermäuse — und irgendwann hat mich die Frage nicht mehr losgelassen: Wie weit trägt ein Ruf wirklich, wenn es kalt und feucht ist? Das NEXUS-System ist mein Versuch, diese Frage messbar zu machen.*

1. Projektziel

Das NEXUS-System (*Network for Environmental eXtreme-precision Ultrasonic Sampling*) ist ein eigenständig entwickeltes, mobiles Monitoring-System zur hochpräzisen Erfassung von Mikroklima-Parametern.

Das Kernziel liegt in der Echtzeit-Berechnung des frequenzabhängigen atmosphärischen Dämpfungskoeffizienten α (Alpha) nach der internationalen Norm **ISO 9613-1**. Dadurch wird es in der bioakustischen Fledermausforschung möglich, die tatsächliche Quelllautstärke sowie die reale Reichweite von Echoortungsrufen unter wechselnden Feldbedingungen mathematisch verlässlich zu rekonstruieren.

2. Hardware-Spezifikationen

2.1 Steuereinheit

Als zentrale Rechen- und Steuereinheit dient der **Seeed XIAO ESP32S3 Sense**.

- **Prozessor:** Dual-Core Xtensa LX7 mit einer Taktfrequenz von 240 MHz
- **Speicher:** 512 KB SRAM, 8 MB PSRAM sowie 8 MB Flash-Speicher
- **Konnektivität:** Integriertes WLAN 802.11b/g/n (2.4 GHz) und Bluetooth 5.0
- **Betriebsspannung:** 3.3V intern (Speisung via USB-C mit 5V)

Begründung der Hardwarewahl: Ausschlaggebend waren die extrem kompakte Bauform ($21 \times 17.5 \text{ mm}$), das integrierte WLAN zur Bereitstellung eines lokalen Daten-Streamings sowie die ausreichende Rechenleistung, um komplexe Fließkomma-Berechnungen nach ISO 9613-1 in Echtzeit direkt im Feld auszuführen.

2.2 Umweltsensorik

BME680 (Bosch Sensortec): Die Kommunikation erfolgt über die I²C-Schnittstelle (Adresse 0x76 oder 0x77).

Parameter	Messbereich	Genauigkeit	Auflösung
Temperatur	-40°C bis +85°C	±0,5°C (bei 0-65°C)	0,01°C
Luftfeuchtigkeit	0 bis 100% rH	±3% rH (bei 20-80%)	0,008% rH
Luftdruck	300 bis 1100 hPa	±0,6 hPa (bei 0-65°C)	0,18 Pa
VOC (Gas)	0 bis 500 IAQ	Qualitativ-relativ	-

Montage & Thermische Entkopplung: Der Sensor ist physisch ca. 12 cm Luftlinie diagonal von der Steuereinheit entfernt auf einer Erweiterungsplatine platziert. In der aktuellen Validierungsphase befindet sich das System zum Witterungsschutz in einer modifizierten Kunststoff-Containerbox ("Tupper-Dose"). Thermische Brücken zwischen dem Hauptprozessor und dem Sensor konnten empirisch ausgeschlossen werden. Für Phase 2 ist ein 3D-gedruckter Strahlungsschutz (Radiation Shield) aus weißem, UV-stabilem ASA (Basis: Thingiverse #1067700) vorgesehen, um Messverfälschungen durch direkte Sonneneinstrahlung komplett zu unterbinden. Der Messzyklus ist fest auf 8 Sekunden eingestellt. Der VOC-Gassensor benötigt nach Systemstart eine thermische Stabilisierungsphase von 25 bis 30 Minuten.

AIR530 GPS-Modul: Die Anbindung erfolgt per UART mit einer Übertragungsrate von 9600 Baud. Das Modul liefert präzise UTC-Zeitstempel sowie Standortdaten im WGS84-Format

(±2.5 m CEP Genauigkeit). Die GPS-Zeit dient der exakten zeitlichen Synchronisation mit den parallel laufenden Ultraschallaufnahmen des TeensyBat-Recorders. Zum Habitatschutz werden die exakten Koordinaten in Publikationen nicht veröffentlicht.

SparkFun Weather Meter Kit (SEN-15901): Die mechanische Wetterstation erfasst über digitale und analoge GPIO-Pins die Parameter Windgeschwindigkeit (Reed-Schalter-Anemometer, Schwellenwert 0,8 bis 70 m/s), Windrichtung (Potentiometer, Auflösung auf 8 Hauptrichtungen) und Niederschlag (Kippwaage, 0,2794 mm pro Impuls). Winddaten sind systembedingt nur bei absolut stationärem Betrieb valide.

2.3 Energieversorgung

Die Stromversorgung erfolgt über eine handelsübliche 10.000 mAh LiPo-Powerbank. Um die automatische Abschaltung moderner Powerbanks bei geringer Last zu umgehen, wird ein Software-Keep-Alive-Trick angewendet: Der Prozessor läuft permanent unter Volllast mit 240 MHz. Die Gesamtlaufzeit beträgt im Dauerbetrieb über 72 Stunden.

2.4 Datenausgabe & Speicherung

Das System spannt im Feld einen eigenen WLAN Access Point mit der SSID `NEXUS_Base` (IP: `192.168.4.1`) auf. Über ein integriertes HTML-Dashboard mit Chart.js werden die Messdaten live visualisiert. Parallel erfolgt ein permanentes Logging auf eine microSD-Karte im CSV-Format. Für Phase 2 ist die Integration eines LoRaWAN-Moduls zur Fernübertragung in Planung.

3. Berechnungsgrundlagen

3.1 Atmosphärische Dämpfung nach ISO 9613-1

Die Berechnung der frequenzabhängigen Schallabsorption durch die Atmosphäre erfolgt im C++ Code des Mikrocontrollers mathematisch präzise nach der Norm ISO 9613-1:

```
$$\alpha = \left( 1.84 \times 10^{-11} \times (p/p_{0})^{-1}
\times (T/T_{0})^{0.5} \times f^{2} \right) + \chi$$
```

- **α:** Atmosphärischer Dämpfungskoeffizient in [dB/m]
- **p/p_{0}:** Gemessener statischer Luftdruck [hPa] / Referenzdruck (1013,25 hPa)

- **T/T_{0}:** Absolute Temperatur in Kelvin [K] / Referenztemperatur (293,15 K $\equiv$ 20°C)
- **f:** Frequenz der Ultraschallwelle in [kHz]
- **χ:** Molekulare Relaxationsabsorption von Sauerstoff (O_2) und Stickstoff (N_2), stark abhängig von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit.

Biologische Relevanz: Bei einer hochfrequenten Art wie der Kleinen Hufeisennase (110 kHz) schwankt α je nach Witterung (kalt/trocken vs. warm/feucht) extrem zwischen 0.8 dB/m und 2.5 dB/m. Auf eine kurze Distanz von nur 10 Metern resultiert daraus ein rein atmosphärisch bedingter Intensitätsunterschied von 8 bis 25 dB.

3.2 Abgedeckte biologische Frequenzbänder

Es werden parallel fünf Ziel-Frequenzen berechnet, um das biologisch relevante Spektrum heimischer Arten abzubilden:

- **20 kHz:** Niedrigfrequente Arten (z. B. Großer Abendsegler – *Nyctalus noctula*)
- **40 kHz:** *Myotis*- und *Plecotus*-Arten (Mausohren und Langohren)
- **55 kHz:** Breitflügelfledermaus (*Eptesicus serotinus*) / Zwergfledermaus (*Pipistrellus pipistrellus*)
- **80 kHz:** Rauhautfledermaus (*Pipistrellus nathusii*)
- **110 kHz:** Kleine Hufeisennase (*Rhinolophus hipposideros*)

4. Datenstruktur & Qualitätssicherung

4.1 CSV-Logging-Format

Der Dateiname folgt der Struktur `DD-MM-YY-N.csv`. Jede Zeile bildet ein exaktes Zeitintervall von 8 Sekunden ab.

```
Date, Time, Lat, Lon, Alt, Sats, HDOP, Temp_C, Hum, DewPoint, Pres_hPa,
Gas_kOhm, Cloud, Wind_Avg_ms, Wind_Gust_ms, Wind_Dir, Wind_Dir_deg,
Rain_mm, Mode, a20k, a40k, a55k, a80k, a110k
```

4.2 Validierung im Feldeinsatz

- **Sensorkalibrierung:** Der werkseitig kalibrierte BME680 wird regelmäßig gegen Datenvorgaben der DWD-Wetterstation Paderborn-Lippstadt (EDLP) abgeglichen (zulässige Toleranz: $\Delta T < 0,3^\circ\text{C}$, $\Delta p < 0,5\text{ hPa}$).
- **Ausschlusskriterium bei Transekten:** Im dynamischen Bewegungsprofil (`Mode=Mobil`) werden die Winddaten systembedingt automatisch als "nicht valide" geflaggt, um Verfälschungen durch die Eigengeschwindigkeit bei der späteren Datenanalyse auszuschließen.

5. Feldeinsatz-Protokoll (Checkliste)

T-30 Minuten vor Messbeginn (Systemstart)

- ☐ Powerbank anschließen und Ladezustand (>80%) verifizieren.
- ☐ WLAN-Verbindung zum Dashboard `NEXUS_Base` prüfen.
- ☐ GPS-Status kontrollieren (Satellitensuche aktiv, LED-Blinken).
- ☐ Bewölkungsgrad manuell im Dashboard in Okta (0-8) hinterlegen.
- ☐ Messmodus festlegen (Mobil oder Stationär).

T-5 Minuten vor Messbeginn (Plausibilitätsprüfung)

- ☐ GPS-Fix bestätigen ($\text{Sats} \ge 4$, $\text{HDOP} < 2$, stabile Positionsdaten).
- ☐ VOC-Gas-Wert auf Stabilisierung prüfen (<10% Schwankung über 2 Min).
- ☐ Messwerte des BME680 auf Plausibilität prüfen.
- ☐ Zeitsynchronisation mit dem Ultraschall-Recorder TeensyBat verifizieren.

T-0 (Start der Aufzeichnung)

- ☐ Synchronen Start von NEXUS-Logging und TeensyBat-Rufaufnahme ausführen.
- ☐ SD-Kartenzugriff (Schreibvorgang) optisch kontrollieren.
- ☐ Eigene Stirnlampe strikt auf den augenschonenden Rotlicht-Modus schalten.

Datenpublikation & Open Science: Nach Abschluss der vollständigen Validierungsphase werden sämtliche gesammelten Rohdaten, Gehäuseschemata sowie der C++ Quellcode unter der freien Lizenz **CC-BY 4.0** auf

dem Repositorium Zenodo (DOI: 10.5281/zenodo.21570857) veröffentlicht, um eine lückenlose Reproduzierbarkeit zu gewährleisten.