

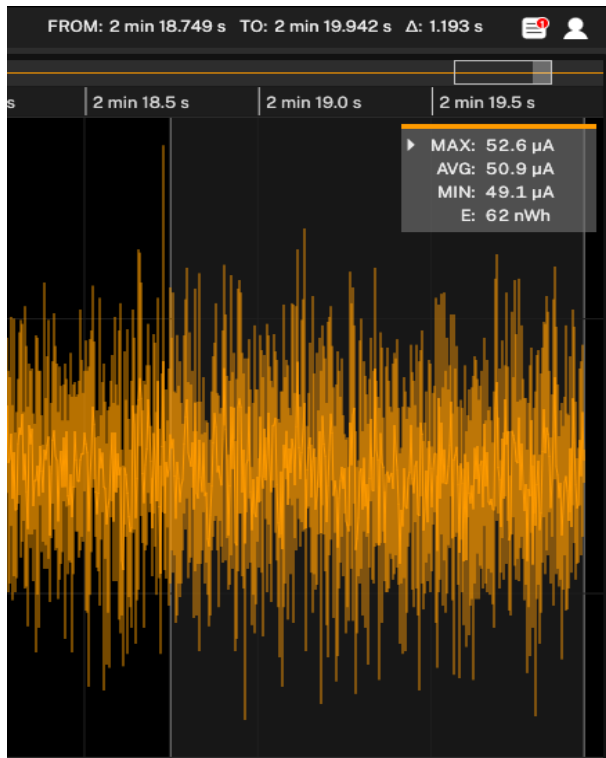
# Batterielebensdauer-Analyse für Aqua-Scope Regenmesser (RANWIE01)

ESP32-Stromprofil gemessen mit OTII Arc — versorgt durch 2 x Bevigor LFB AAA ( $\text{LiFeS}_2$ , äquivalent zu Energizer Ultimate Lithium AAA / L92)

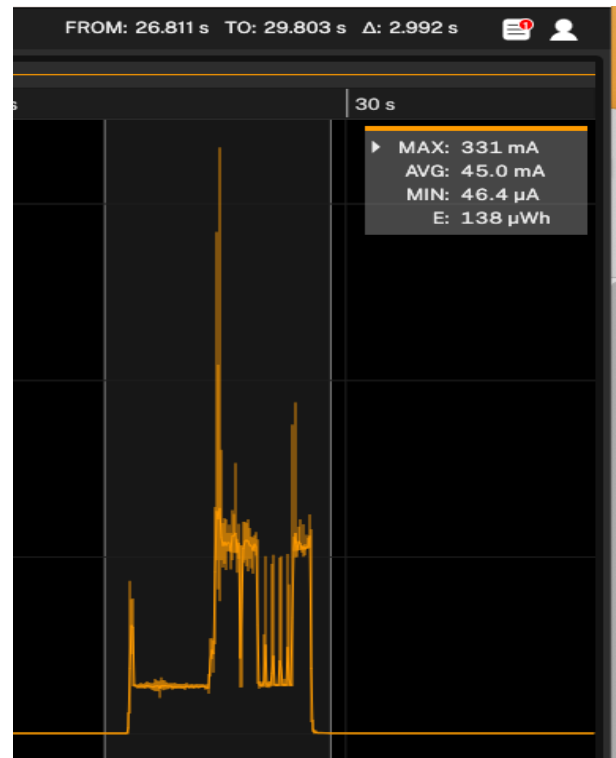
Datum: 2026-05-12

## 1. Gemessenes Stromprofil

Die Stromaufnahme des ESP32-basierten Geräts wurde mit einem OTII Arc Batterieanalysator gemessen. Zwei Betriebszustände wurden erfasst:



*Tiefschlaf* — Mittel 50,9 µA (min 49,1 / max 52,6 µA)



*Wi-Fi-Aufwachvorgang* — Mittel 45,0 mA über 2,99 s (Spitze 331 mA)

Parameter	Wert	Quelle
Schlafstrom (Mittelwert)	51,0 µA	OTII-Screenshot 1
Wi-Fi-Wachstrom (Mittel)	45,0 mA	OTII-Screenshot 2
Wi-Fi-Wachdauer	3,00 s	OTII-Screenshot 2
Aufwachvorgänge pro Tag	5	alle 6 h ⇒ 4/Tag + 1 extra
Pack-Abschaltspannung	2,9 V (1,45 V/Zelle)	ESP32-Brownout

## 2. Batterie: Bevigor LFB AAA (LiFeS<sub>2</sub>)

Der Regenschirm wird durch zwei in Reihe geschaltete **Bevigor LFB AAA** Lithium-Eisendisulfid-Zellen (LiFeS<sub>2</sub>) gespeist, was eine nominale Packspannung von 3,0 V (1,5 V pro Zelle) ergibt. Die LFB AAA ist chemisch und mechanisch äquivalent zur Energizer Ultimate Lithium AAA (L92), daher werden deren Datenblattwerte für diese Analyse verwendet:

Eigenschaft	Wert
Bauform	AAA (LR03 / R03 Größe)
Chemie	Lithium-Eisendisulfid (LiFeS <sub>2</sub> )
Nennspannung	1,5 V pro Zelle / 3,0 V Pack
Leerlaufspannung	≈ 1,8 V pro Zelle (frisch)
Nennkapazität	1250 mAh bis 1,0 V/Zelle bei 25 mA, 21 °C
Betriebstemperatur	-40 °C ... +60 °C
Selbstentladung	≤ 0,5 % pro Jahr (>90 % nach 20 a)
Innenwiderstand	90 ... 250 mΩ
Gewicht	≈ 7,5 g pro Zelle

**Entlade- / Spannungsverlauf.** LiFeS<sub>2</sub>-Zellen haben eine ungewöhnlich flache Entladekurve: bei geringer Last bleibt die Zellspannung für den Großteil der Kapazität zwischen 1,55 V und 1,45 V und fällt dann jenseits des "Knies" rapide ab. Der ESP32-Brownout des Regenschirms ist auf 2,9 V eingestellt (d. h. 1,45 V pro Zelle), das Gerät läuft also fast bis zum Knie der Entladekurve, bevor es abschaltet. Bei der sehr geringen mittleren Last dieses Designs (≈ 0,06 mA) bleibt die Zelle für etwa die ersten **1200 mAh** ihrer 1250 mAh Nennkapazität über 1,45 V.

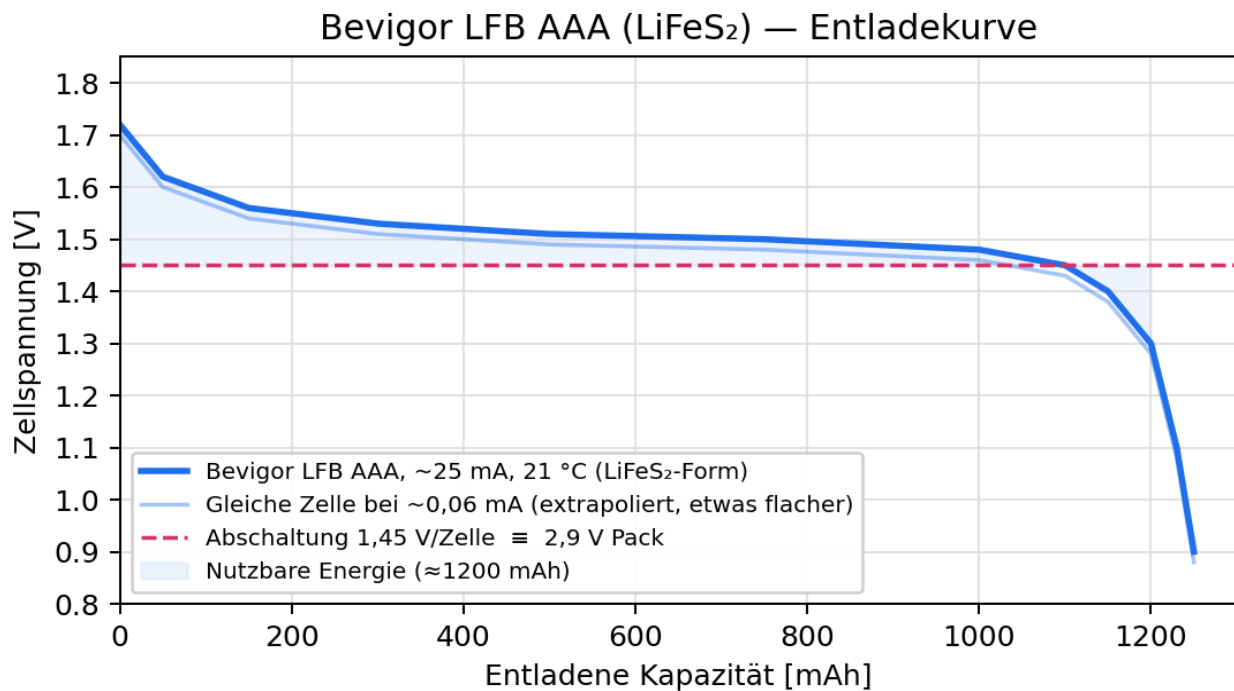


Abb. 1 — Repräsentative L91-Einzelzellen-Entladekurve. Die blau schattierte Fläche ist die nutzbare Energie, bevor die 3,0 V Pack-Abschaltung erreicht wird.

### 3. Tägliches Energiebudget

Phase	Strom	Zeit / Tag	Ladung	Anteil
Tiefschlaf	51,0 $\mu$ A	86385 s (23,996 h)	1,2238 mAh	86,7 %
Wi-Fi-Aufwachvorgänge (5/Tag $\times$ 3 s)	45,0 mA	15 s	0,1875 mAh	13,3 %
<b>GESAMT pro Tag</b>	—	<b>86400 s (24 h)</b>	<b>1,4113 mAh</b>	<b>100 %</b>
<b>Mittlerer Strom</b>	<b>58,80 <math>\mu</math>A</b>	—	—	—

**Beobachtung.** Obwohl ein Wi-Fi-Aufwachvorgang  $\sim$ 880-mal mehr Strom zieht als der Schlaf, dauert er nur 15 s von 86 400 s. Der Tiefschlafstrom dominiert die Tagesladung trotzdem um den Faktor  $\approx$ 6,5.

### 4. Erwartete Batterielebensdauer

Das Pack besteht aus zwei in Reihe geschalteten Zellen, die Kapazität entspricht also der einer einzelnen AAA-Zelle. Drei Szenarien werden für die nutzbare Kapazität bis 1,45 V pro Zelle (= 2,9 V Pack-Abschaltung) berechnet:

Szenario (Abschaltung 2,9 V Pack $\equiv$ 1,45 V/Zelle)	Nutzbare Kapazität	Lebensdauer (ideal)	Lebensdauer (inkl. 0,5 %/a)
Konservativ (1050 mAh bis 1,45 V/Zelle)	1050 mAh	2,04 a (744 d)	2,02 a (737 d)
Typisch (1200 mAh bis 1,45 V/Zelle)	1200 mAh	2,33 a (850 d)	2,30 a (841 d)
Optimistisch (1250 mAh bis 1,0 V/Zelle)	1250 mAh	2,42 a (886 d)	2,40 a (875 d)

## Erwartete Lebensdauer $\approx$ 2,3 Jahre

(typisch: 1200 mAh nutzbar bis 2,9 V Pack, 5 Aufwachvorgänge / Tag, inkl. Selbstentladung)

### 5. Annahmen & Anmerkungen

- Konstante Umgebungstemperatur um 21 °C. Bei  $< 0$  °C liefert die L91 weiterhin den Großteil ihrer Kapazität, das Spannungsplateau sinkt jedoch leicht ab, was die nutzbare Kapazität oberhalb von 3,0 V Pack verkürzen kann.
- Pulsströme während des Wi-Fi-Aufwachvorgangs (Spitze 331 mA) liegen deutlich unter der Dauerstrom-Belastbarkeit der AAA LiFeS<sub>2</sub>-Zelle (1,5 A) und der Pulsbelastbarkeit (2 A), es wird daher kein zusätzlicher Spannungseinbruch erwartet.
- Es wird angenommen, dass beide Zellen gepaart sind. Bei ungleichen Zellen erreicht die schwächere früher 1,5 V und begrenzt das Pack.
- Die Selbstentladung wird als konstante 0,5 % der verbleibenden Kapazität pro Jahr modelliert, der typische Wert von Energizer (20 Jahre Lagerfähigkeit,  $\geq$  90 % verbleibend).
- Die "typische" Kapazität von 1200 mAh ist die Energie, die oberhalb von 1,45 V pro Zelle bei sub-mA-Lasten verfügbar ist. Bei höheren Lasten (oder höherer Abschaltspannung) wäre dieser Wert geringer.
- Soll die Lebensdauer weiter verlängert werden, ist der Schlafstrom der größte Hebel: eine Reduktion von 51  $\mu$ A auf 10  $\mu$ A würde die Lebensdauer auf etwa 7,7 Jahre erhöhen.

## 6. Umstände, die die Batterielebensdauer verkürzen können

Zwei reale Bedingungen können die berechnete Lebensdauer spürbar verringern:

**Schlechte WLAN-Verbindung.** Die Basisrechnung geht von einem 3-Sekunden-Aufwachvorgang aus, um sich mit dem Access Point zu verbinden und eine Messung an die Cloud zu senden. Ist die WLAN-Verbindung langsam (schwaches Signal, ausgelasteter Router, DHCP-Verzögerungen, DNS-Wiederholungen) und der Aufwachvorgang dauert doppelt so lange — etwa **6 Sekunden** statt 3 — so verdoppelt sich die Aktivladung von **0,188 mAh/Tag** auf **0,375 mAh/Tag**. Das tägliche Energiebudget steigt von 1,411 mAh auf 1,599 mAh und verkürzt die erwartete Lebensdauer um etwa **12 %** — von 2,30 Jahren auf rund **2,03 Jahre** ( $\approx 97$  Tage weniger).

**Gealterte oder beschädigte Batterie.** Mit zunehmendem Alter (oder bei Kälte) steigt der Innenwiderstand der Zellen und das Spannungsplateau wird abgesenkt. Die Packspannung erreicht die 2,9-V-Abschaltswelle dadurch früher in der Entladekurve, und nutzbare Kapazität bleibt oberhalb der Abschaltspannung ungenutzt. Eine gealterte Batterie liefert möglicherweise nur 800–1000 mAh nutzbare Ladung statt 1200 mAh und verkürzt die Lebensdauer entsprechend (z. B. von 2,30 Jahren auf  $\sim 1,92$  Jahre bei 1000 mAh nutzbar).

## 7. Möglichkeiten zur Verlängerung der Batterielebensdauer

Die Basisrechnung geht von 5 Aufwachvorgängen pro Tag aus (alle 6 h + 1 extra). Das Gerät muss eigentlich nur dann melden, wenn es etwas zu berichten gibt:

- **365 Regenerereignis-Meldungen pro Jahr** (im Mittel 1/Tag — in Trockenzeiten weniger, in Regenzeiten mehr).
- **Täglicher Heartbeat von 2 auf 1 pro Tag reduziert** (365/Jahr). Das 6-Stunden-Intervall ist übertrieben für einen Sensor, dessen einzige Aufgabe es ist zu bestätigen „noch am Leben“.

Das ergibt 730 Aufwachvorgänge pro Jahr  $\approx$  **2 Aufwachvorgänge pro Tag** im Mittel, statt 5/Tag. Das neue Tagesbudget lautet:

- Aktiv:  $45 \text{ mA} \times 6 \text{ s} = \mathbf{0,075 \text{ mAh/Tag}}$
- Tiefschlaf:  $51 \text{ }\mu\text{A} \times 86394 \text{ s} = \mathbf{1,224 \text{ mAh/Tag}}$
- **Gesamt: 1,299 mAh/Tag** (gegenüber 1,411 mAh/Tag in der Basisrechnung mit 5 Aufwachvorgängen)

Die erwartete Lebensdauer steigt in diesem Szenario auf etwa **2,50 Jahre** (1200 mAh / 1,315 mAh/Tag inkl. Selbstentladung), eine Verbesserung von **9 %** gegenüber der Basis mit 5 Aufwachvorgängen ( $\approx 72$  zusätzliche Tage).

**Verlängerte Lebensdauer  $\approx$  2,50 Jahre**

(2 Aufwachvorgänge/Tag statt 5, 1200 mAh, inkl. Selbstentladung)