



Technische Dokumentation: VLF-Resonanz-Ferritantenne für 17,2 kHz (SAQ)

Diese Dokumentation fasst die physikalischen Berechnungen, die schaltungstechnische Rauschanalyse und die Feldstärke-Kalibrierung für den Empfang des schwedischen Längstwellensenders SAQ Grimeton am Standort Cuxhaven zusammen.

1. Antennen-Parameter & Geometrie

- **Abmessungen:** Länge = 12 cm, Durchmesser = 1 cm (Schlankheitsgrad = 12)
- **Wicklung:** $N = 900$ Windungen als kapazitätsarme Stufenwicklung
- **Abgriff:** Symmetrischer Mittelabgriff auf Masse; Auskopplung bei $1/3$ der Gesamtwicklung (300 Windungen)
- **Resonanzkapazität:** ca. 1400 pF (ergibt eine erforderliche Kreisinduktivität von 61,16 mH)
- **Materialkonstanten:** Ringpermeabilität des Stabes $\mu_i \approx 300$
- **Effektive Permeabilität:** Aufgrund des Entmagnetisierungsfaktors (Geometrie) bricht die effektive Permeabilität des Stabs auf $\mu_{\text{eff}} \approx 43$ ein.
- **Kreisgüte (Q):** Durch die Stufenwicklung vorsichtig auf $Q = 200$ geschätzt.
- **Effektive Antennenhöhe (h_{eff}):** Aufgrund der VLF-Wellenlänge ($\lambda \approx 17.442$ m) beträgt die physikalische Wirkfläche $h_{\text{eff}} \approx 0,11$ mm.

2. Schaltungstechnische Rauschanalyse

- **Resonanzwiderstand (R_p):** Beträgt ca. $1,32 \text{ M}\Omega$ bezogen auf die Gesamtwicklung.
- **Quellimpedanz am Transistor (R_G):** Durch die $1/3$ -Anzapfung transformiert sich die Impedanz quadratisch $(1/3)^2 = 1/9$ nach unten auf **$147 \text{ k}\Omega$** .
- **Arbeitspunkt 1. Transistor (MPSA18 Emitterfolger):**
 - Versorgungsspannung $4,5 \text{ V}$, Emitterwiderstand $100 \text{ k}\Omega \rightarrow$ Kollektorstrom $I_C \approx 28 \mu\text{A}$.
 - Durch den minimalen Strom sinkt das Stromrauschen des Transistors auf $i_n \approx 0,13 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$.
- **Rauschspannungen am $1/3$ -Abgriff (bei Filterbandbreite $B = 100 \text{ Hz}$):**
 - **Thermisches Kreisrauschen (Ferritspule): 484 nV** (bestimmender Faktor!)
 - **Eigenrauschen der Transistorstufe: 190 nV**
 - **System-Gesamtrauschen (intern): $\sqrt{484^2 + 190^2} \approx 520 \text{ nV}$** (entspricht einer äquivalenten Rauschfeldstärke von nur **$7,1 \mu\text{V/m}$**).

3. Kalibrierung der SAQ-Feldstärke (Standort Cuxhaven)

Unter Einbeziehung der **Austin-Cohen-Formel** und dem empirischen S-Meter-Vergleich auf einem Kiwi-WebSDR (SAQ und der britische Sender GBZ Anthorn werden beide mit ca. **S6** angezeigt) wurden die realen Feldstärken tagsüber präzise bestimmt:

- **GBZ Anthorn (UK):** 30 kW ERP auf 783 km Distanz → **$1554 \mu\text{V/m}$**
- **SAQ Grimeton (SE):** Sendeleistung auf 80 kW begrenzt, Antennenwirkungsgrad 12 % bis 14 % → **10 kW ERP**.
 - Auf 430 km Distanz über die Nordsee nach Cuxhaven ergibt dies eine reale Feldstärke von **$1890 \mu\text{V/m}$** .
 - Der Unterschied zwischen GBZ und SAQ beträgt nur 1,7 dB, was die identische S6-Anzeige mathematisch exakt bestätigt.

4. Das finale Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) am Tag

Zustand / Signal (Cuxhaven)	Feldstärke	Spannung am 1/3- Abgriff ($B = 100$	Empfänger-Verhalten
		Hz)	
SAQ Nutzsignal (Tag)	$1890 \mu\text{V/m}$	138.000 nV ($138 \mu\text{V}$)	Nutzsignal
Atmosphärisches Rauschen (Sommer, Tag)	$\sim 12 \mu\text{V/m}$	876 nV	System arbeitet <i>antennenrauschbegrenzt.</i>
Schaltungs- & Kreisrauschen (Konstant)	<i>Intern</i>	520 nV	Physikalisches Limit der Hardware.
Atmosphärisches Rauschen (Winter, Tag)	$\sim 3 \mu\text{V/m}$	220 nV	System arbeitet <i>empfänger- rauschbegrenzt.</i>

5. Ergänzende Hinweise zur Schaltungsdimensionierung

- **Ungeeignetheit von HF-Transistoren:** Echte Hochfrequenz-Typen (wie die BF-Serie) besitzen systembedingt eine geringe Gleichstromverstärkung, was zu einem niedrigen Eingangswiderstand führt und den selektiven VLF-Eingangskreis massiv bedämpft (Güteverlust). Zudem liegt deren Rauschdecke (*Corner Frequency* des $1/f$ -Flackerrauschens) konstruktionsbedingt sehr hoch, wodurch sie im Längstwellenbereich bei 17,2 kHz ein erheblich höheres Eigenrauschen erzeugen als moderne NF-Typen.
- **Notwendigkeit hoher Stromverstärkung (h_{FE}):** Um den Schwingkreis im Resonanzbetrieb so wenig wie möglich durch die nachfolgende Elektronik zu belasten, ist eine extrem hohe Stromverstärkung zwingend erforderlich. Nur ein hoher h_{FE} -Wert (wie beim MPSA18 oder BC550C) transformiert den Eingangswiderstand der Stufe so weit nach oben, dass die mühsam erarbeitete Spulengüte ($Q = 200$) und damit die schmale Bandbreite voll erhalten bleibt.
- **Vorteil der Kaskade (Zweistufigkeit) gegenüber Einzeltransistoren:** Ein einzelner Transistor, der gleichzeitig Impedanz wandeln und Spannung verstärken soll, muss in Emitterschaltung betrieben werden. Dies führt über den *Miller-Effekt* (Rückwirkungskapazität) zu einer starken kapazitiven Belastung und Verstimmung des Schwingkreises. Die Trennung in eine erste Stufe als reiner Impedanzwandler (Kollektorschaltung ohne Miller-Effekt) und eine nachgeschaltete Spannungsverstärkung hält den Eingang extrem hochohmig und rauscharm.
- **Pegel-Unterschiede bei PC-Soundkarten:** Je nach Qualität der verwendeten Audio-Hardware (On-Board-Chipsätze vs. geschirmte, dedizierte Soundkarten) kann der interne Rauschteppich (*Noise Floor*) um bis zu **40 dB** (Spannungsfaktor 100) variieren. Ein unbedämpfter PC-Eingang macht schwache VLF-Signale unlesbar, weshalb eine ausreichende Vorverstärkung unerlässlich ist, um das Signal über dieses Quantisierungs- und Wandlerrauschen zu heben.

- **Interne PC-Störsignale:** Im Inneren eines PCs takten CPU, RAM und Bus-Systeme im Gigahertz-Bereich. Die steilen Schaltflanken koppeln über parasitäre Kapazitäten als digitaler Störnebel direkt in die analogen Leitungen der Soundkarte ein. Hinzu kommen massive Masse-Schleifen (*Ground Loops*) über das PC-Schaltnetzteil, die ohne ausreichende Signalbefuerung durch einen Vorverstärker den VLF-Bereich unbrauchbar machen.
- **Das Indoor-Paradoxon:** Obwohl die magnetischen Feldlinien des H-Feldes Ziegel- und Betonwände nahezu ungehindert durchdringen, mutiert das Gebäudeinnere durch Netzteile, LED-Treiber und Hausverkabelung zur aktiven Störquelle. Dieses massive magnetische Nahfeld hebt den lokalen Störteppich im Zimmer oft um das Hundertfache über das atmosphärische Außenrauschen an, wodurch das SAQ-Signal maskiert wird. Der Betrieb im Freien (Garten/Feld) ist zwingend nötig, um das physikalische Limit der Antenne freizusetzen.
- **Die Permeabilitäts-Illusion bei Stäben:** Die in Datenblättern angegebene hohe Anfangspermeabilität (z. B. $\mu_i = 1000$ oder höher) gilt ausschließlich für geschlossene Ringkerne. Sobald das Material als gerader Stab ausgeführt wird, bricht die effektive Permeabilität (μ_{eff}) aufgrund des geometrisch bedingten Entmagnetisierungsfaktors (Luftrücklauf) drastisch ein. Bei einem typischen Schlankheitsgrad von ca. 12 (z. B. 12 cm Länge zu 1 cm Durchmesser) ist der Unterschied zwischen einem vermeintlich besseren $\mu_i = 1000$ -Kern und einem Standard-Mittelwellenstab ($\mu_i = 300$) in der Praxis nahezu bedeutungslos, da beide geometriebedingt bei einem μ_{eff} von ca. 40 bis 60 gedeckelt werden. Ein höherer Materialwert bringt ohne extreme mechanische Verlängerung des Stabes keinen Gewinn an Signalspannung.