

Technische Projektdokumentation & Bauanleitung

Optimierte VLF-Senderspule (8,33 kHz) auf DN100-Wickelkörper

Amateurfunk-Leistungsprojekt

27. Juni 2026

Inhaltsverzeichnis

1	Mathematische & Physikalische Grundlagen	2
1.1	Verwendetes Formelwerk	2
2	Detaillierte Schritt-für-Schritt-Berechnung	2
2.1	Berechnung der Spulengeometrie	2
2.2	Berechnung der Blindwiderstände (Reaktanzen)	3
2.3	Drahtlänge und Ohmscher Widerstand (R_{Cu})	3
3	Leistungsbilanz & Elektrischer Wirkungsgrad	4
3.1	Effektivstrom und Leistungaufteilung	4
3.2	Elektrischer Wirkungsgrad (η)	4
4	Feldstärkenanalyse im Nahfeld (10 m Distanz)	4
5	Materialauswahl & Werkstattdaten	4
5.1	Praktischer Wickelhinweis	4

1 Mathematische & Physikalische Grundlagen

Die Senderspule bildet zusammen mit einem Serienkondensator einen elektrischen Serienresonanzkreis. Um maximale Energie bei der Zielfrequenz von $f = 8,3333 \text{ kHz}$ zu übertragen, müssen sich die Blindanteile der Komponenten vollständig aufheben.

1.1 Verwendetes Formelwerk

1. **Thomson-Resonanzformel:** Bestimmung der erforderlichen Induktivität L bei gegebener Kapazität C :

$$L = \frac{1}{(2\pi \cdot f)^2 \cdot C} \quad (1)$$

2. **Modifizierte Wheaton-Formel (Zylinder-Luftspule):** Berechnung der mechanischen Wicklungslänge b aus Radius R und Windungszahl N :

$$b = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot \pi \cdot R^2}{L} - 0,9 \cdot R \quad (2)$$

3. **Blindwiderstände (Reaktanzen):**

$$X_L = 2\pi f \cdot L \quad \text{und} \quad X_C = \frac{1}{2\pi f \cdot C} \quad (3)$$

4. **Spezifischer Ohmscher Drahtwiderstand (R_{Cu}):**

$$R_{Cu} = \rho \cdot \frac{l}{A} = \rho \cdot \frac{N \cdot 2\pi R}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (4)$$

wobei $\rho_{\text{Kupfer}} \approx 0,0178 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ entspricht.

5. **Magnetische Feldstärke (H) im Nahfeld (10 m Distanz):**

$$H = \frac{N \cdot I_{\text{eff}} \cdot \pi \cdot R^2}{2 \cdot r^3} \quad [\text{A/m}] \quad (5)$$

$$L_H = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{H}{1 \mu\text{A/m}} \right) \quad [\text{dB}\mu\text{A/m}] \quad (6)$$

—

2 Detaillierte Schritt-für-Schritt-Berechnung

Für den Einsatz eines Standard-HT-Rohrs DN100 ergibt sich durch die Normmaße ein exakter Außendurchmesser von 110 mm, folglich ist der Radius $R = 0,055 \text{ m}$. Die Windungszahl ist auf $N = 70$ festgesetzt; die Serienkapazität beträgt $C = 1 \mu\text{F}$.

2.1 Berechnung der Spulengeometrie

Zur Resonanzherstellung bei $f = 8333,3 \text{ Hz}$ ($\omega \approx 52360 \text{ rad/s}$) wird folgende Ziel-Induktivität benötigt:

$$L = \frac{1}{(52360)^2 \cdot 10^{-6} \text{ F}} \approx \mathbf{0,365 \text{ mH}} \quad (365 \mu\text{H})$$

Eingesetzt in die Geometrieformel ergibt sich die exakte mechanische Wicklungslänge b :

$$b = \frac{(4\pi \cdot 10^{-7}) \cdot 70^2 \cdot \pi \cdot (0,055 \text{ m})^2}{0,000365 \text{ H}} - (0,9 \cdot 0,055 \text{ m})$$

$$b = \frac{0,00005852}{0,000365} - 0,0495 \text{ m} = 0,1603 \text{ m} - 0,0495 \text{ m} = \mathbf{0,1108 \text{ m}}$$

Die Wicklung muss somit auf dem Rohr präzise auf ****111 mm**** gestreckt werden.

2.2 Berechnung der Blindwiderstände (Reaktanzen)

- Induktiver Blindwiderstand: $X_L = 52360 \text{ rad/s} \cdot 0,000365 \text{ H} = \mathbf{19,11 \Omega}$
- Kapazitiver Blindwiderstand: $X_C = \frac{1}{52360 \text{ rad/s} \cdot 10^{-6} \text{ F}} = \mathbf{19,10 \Omega}$
- **Gesamt-Reaktanz:** $X_{Gesamt} = X_C - X_L \approx \mathbf{0 \Omega}$ (Vollständige Kompensation).

2.3 Drahtlänge und Ohmscher Widerstand (R_{Cu})

Für den gewählten Kupferlackdraht mit Nenndurchmesser $\emptyset = 0,63 \text{ mm}$ (Querschnitt $A = 0,3117 \text{ mm}^2$):

- **Reine Drahtlänge (l):** $l = 70 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 0,055 \text{ m}) \approx \mathbf{24,19 \text{ m}}$
- **Gleichstromwiderstand (R_{Cu}):** $R_{Cu} = 0,0178 \cdot \frac{24,19 \text{ m}}{0,3117 \text{ mm}^2} \approx \mathbf{1,38 \Omega}$

3 Leistungsbilanz & Elektrischer Wirkungsgrad

Durch den modifizierten Basisvorwiderstand $R_5 = 680 \Omega$ steuert die komplementäre Bipolar-Gegentaktendstufe ($T1: FZT692B$ / $T2: FZT753$) kontrolliert auf einen Last-Spitzenstrom von $I_{Spitze} \approx 1,15 \text{ A}$ aus.

3.1 Effektivstrom und Leistungsaufteilung

Der effektive Wechselstrom durch den Schwingkreis beträgt:

$$I_{eff} = \frac{1,15 \text{ A}}{\sqrt{2}} \approx 0,81 \text{ A} \quad (810 \text{ mA})$$

Daraus ergeben sich im Sendebetrieb folgende Leistungsdaten:

- **Aufgenommene Gesamtleistung (P_{DC} aus 12 V):** ca. **6,80 Watt**
- **In der Spule umgesetzte Wirkleistung (P_{Last}):** $P_{Last} = I_{eff}^2 \cdot R_{Cu} = (0,81 \text{ A})^2 \cdot 1,38 \Omega \approx 0,91 \text{ Watt}$
- **Gesamtverlustleistung Endstufe ($P_{Verlust}$):** $P_{DC} - P_{Last} \approx 5,89 \text{ Watt}$

3.2 Elektrischer Wirkungsgrad (η)

Der reine elektrische Wirkungsgrad der Spulenansteuerung berechnet sich aus dem Verhältnis der in der Spule umgesetzten Leistung zur aufgenommenen Gleichstromleistung:

$$\eta = \frac{P_{Last}}{P_{DC}} \cdot 100\% = \frac{0,91 \text{ W}}{6,80 \text{ W}} \cdot 100\% \approx 13,4 \%$$

Hinweis: Die verbleibende Leistung wird als Wärme in den Endstufentransistoren dissipiert ($\approx 1,47 \text{ W}$ pro Transistor im praktischen Tastbetrieb), wodurch die Schaltung ohne klobigen externen Serienwiderstand eigensicher arbeitet.

4 Feldstärkenanalyse im Nahfeld (10 m Distanz)

Durch den vergrößerten Durchmesser des DN100-Rohrkörpers wächst die wirksame magnetische Antennenfläche deutlich. Bei einem Effektivstrom von 810 mA ergibt sich:

$$H = \frac{70 \cdot 0,81 \text{ A} \cdot \pi \cdot (0,055 \text{ m})^2}{2 \cdot (10 \text{ m})^3} \approx 0,000269 \text{ A/m} \quad (269 \mu\text{A/m})$$

Umgerechnet in den logarithmischen Feldstärkepegel:

$$L_H = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{269 \mu\text{A/m}}{1 \mu\text{A/m}} \right) \approx 48,59 \text{ dB}\mu\text{A/m}$$

5 Materialauswahl & Werkstattdaten

5.1 Praktischer Wickelhinweis

Da 70 Windungen des Drahtes stramm nebeneinander nur 45,5 mm einnehmen würden, die ideale Resonanzlänge jedoch bei 111 mm liegt, wird die Spule mit einer gleichmäßigen Steigung gewickelt. Zwischen den einzelnen Windungen verbleibt beim Wickeln rechnerisch eine kontrollierte Lücke von knapp **0,9 mm**.

Tabelle 1: Zusammenfassende Kennwerte für den praktischen Aufbau

Komponente	Spezifikation	Wert / Herkunft
Wickelkörper	HT-Rohr DN100	$\emptyset_{\text{Außen}} = 110 \text{ mm}$
Kupferlackdraht	BLOCK CUL 100/0,63	$\emptyset = 0,63 \text{ mm}$ (Nennstrom 1,00 A)
Materialmenge	2x Spule à 100 g	Liefert $2 \times 28 \text{ m}$ (Bedarf: $2 \times 24,2 \text{ m}$)
Wicklungsbreite (b)	Zielmaß auf Rohrkörper	111 mm (11,1 cm)
Platinenwiderstand R_5	Metallschicht / SMD	680 Ω (ersetzt ursprünglichen 1 k Ω)