

Einlagige Luftspule

Programme zur Berechnung von Zylinderspulen gibt es zur Genüge. Was Du aber mit Sicherheit nicht so schnell finden wirst ist ein Tool, welches gleichzeitig auch parasitäre Kapazität und Parallelresonanz abschätzt, die optimale Spule vorschlägt und als Zugabe auch noch die geometrischen Abmessungen in natürlicher Größe anzeigt.

Hinweis: Die zugrundeliegenden Formeln sind Näherungen, also mehr oder weniger ungenau. Es wird vereinfachend angenommen, dass die Drahtstärke gegenüber dem Durchmesser des Zylinders vernachlässigbar klein ist, demzufolge bleibt ihr Einfluss gering und sie kann unberücksichtigt bleiben.

Vorbereitung:

Damit auch Dein Monitor die Spule im Maßstab 1:1 anzeigt, musst Du vor der erstmaligen Benutzung des Programms die Grafikanzeige folgt kalibrieren:

Messe die Breite des weißen Bildfelds mit einem Lineal und trage den Wert in das Feld "Breite" ein. Dieser Wert geht nicht verloren, sondern steht nach einem erneuten Programmstart automatisch wieder zur Verfügung!

Beispiel 1:

In der "[Künstlichen Stationserde MFJ -931](#)" befindet sich eine schaltbare Luftspule mit 18 Windungen, dem Durchmesser 6,2cm und der Länge 4,5cm.

Welche maximale Induktivität hat diese Spule (Schalterstellung L)?



Auf der Tab-Seite "Allgemein" markierst Du mit dem kleinen runden Button das Feld für die gesuchte Größe, in unserem Fall also "Induktivität".
In die anderen Felder trägst Du die gegebenen Werte ein.

Nach Klick auf "START" erhältst Du nicht nur das Ergebnis (ca. 17 μ H), sondern neben weiteren Parametern auch die Seitenansicht der Spule im Maßstab 1:1:

Da die Spulenkapazität ca. 3pF beträgt, liegt die erste Parallelresonanz bei ca. 22MHz. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass der MFJ-931 zumindest in Schalterstellung L nicht mehr auf dem 15m-Band und höher betrieben werden kann (siehe [Spulenrechner](#))!

Mit dem Button "Kontrolle" kannst Du Dir zu Vergleichszwecken das Ergebnis einer alternativen Berechnungsmethode anzeigen lassen, die nicht auf der verwendeten Näherungsformel basiert, sondern auf einer Integration über die magnetische Feldverteilung:

Beispiel 2:

Seit den Anfängen der Rundfunktechnik ist bekannt, dass für eine so genannte "optimale" Spule ein Verhältnis $l/D = 0,45$ gilt. Damit erreichst Du die gewünschte Induktivität mit der geringstmöglichen Drahtlänge.

Wie groß müssen Windungszahl und Länge einer optimalen 1µH-Spule sein, wenn ein Wickelkörper mit 2cm Durchmesser zur Verfügung steht?

Diesmal wählst Du die Tab-Seite "Optimal" und markierst als gesuchten Parameter die "Windungszahl".

Beim Eintragen des Durchmessers merkst Du, dass die Spulenlänge automatisch im Verhältnis $l/D = 0,45$ angepasst wird. Erst danach den "START"-Button klicken:

Einlagige Luftspule V 1.0

Allgemein Optimal

☐ Induktivität (µH) 1

☒ Windungszahl 6,7

Durchmesser (cm) 2

Länge (cm) 0,9

Info

Kapazität (pF) 1,08

Eigenresonanz (MHz) 153,36

Kontrolle

Windungsabstand (mm) 1,3

Reset

Drahtlänge (cm) 42,7

Länge/Durchmesser 0,45

START

Zeichenfläche: Breite(cm) 15 Höhe(cm) 7,5 ☐ Fenster oben 17 DL1JWD

In der Praxis wird l/D meist etwas größer gewählt, die Spule wird also mehr oder weniger gestreckt.

Für eine hohe Spulengüte gibt es folgende Empfehlungen für das Verhältnis Länge zu Durchmesser:

KW-Spulen: $l/D = 1 \dots 2$

UKW-Spulen: $l/D = 0,5 \dots 1,5$

Der Windungsabstand, wie ihn das Programm anzeigt, ist nicht zu verwechseln mit dem Zwischenraum zwischen den Windungen, sondern er wird gemessen zwischen den Mittelachsen benachbarter Windungen.

Er sollte, zumindest bei UKW-Spulen, gleich dem Drahtdurchmesser sein, damit die Spulenkapazität klein bleibt.

Auch ein späterer Abgleich der Induktivität (durch Zusammen- bzw. Auseinanderdrücken der Windungen) wird erleichtert, wenn der Windungsabstand nicht zu knapp bemessen ist.

Weitere nützliche praktische Empfehlungen, vorrangig für den Antennenbauer, findest Du [hier](#).

Etwas Theorie

Ausgangspunkt für die Berechnung der Induktivität einer einlagigen Zylinderspule ist das [Biot-Savart-Gesetz](#), es gibt an, wie die magnetische [Feldstärke](#) zu berechnen ist, die im Punkt P des Raumes von einer dünnen Leiterschleife, in der ein Strom I fließt, erzeugt wird.

Eine längere Rechnerei mit mehreren Vereinfachungen führt dann zu der bekannten Näherungsformel für die [Induktivität](#) einer einlagigen zylindrischen Luftspule mit der **Windungszahl N** sowie der **Länge l**:

$$L \approx \frac{\mu_0 N^2 A}{l + 0.45 D}$$

Hier bedeuten A die Querschnittsfläche für den **Windungsdurchmesser D**

$$A = \pi D^2 / 4$$

und μ_0 die magnetische Feldkonstante

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$$

Daraus resultiert die bekannte Größengleichung für die Maßeinheiten **µH** und **cm**:

$$L \approx \frac{N^2 D}{45 + 100 \frac{l}{D}}$$

Logischerweise steigt bei einer kurzen Spule mit gleicher Windungszahl die magnetische Kopplung zwischen den einzelnen Windungen, woraus sich eine höhere Induktivität ergibt. Umgekehrt verkleinert ein Auseinanderziehen der Windungen die Induktivität.

Die parasitäre Kapazität

... und daraus abgeleitet die erste Parallelresonanz schätzt das Programm nach der aus den 1940er Jahren stammenden Medhurst-Formel, wie sie vor allem zur Berechnung von [Tesla](#)-Transformatoren verwendet wird:

$$C_p = 0.144 l + 0.161 r + 0.746 \sqrt{r^3 / l}$$

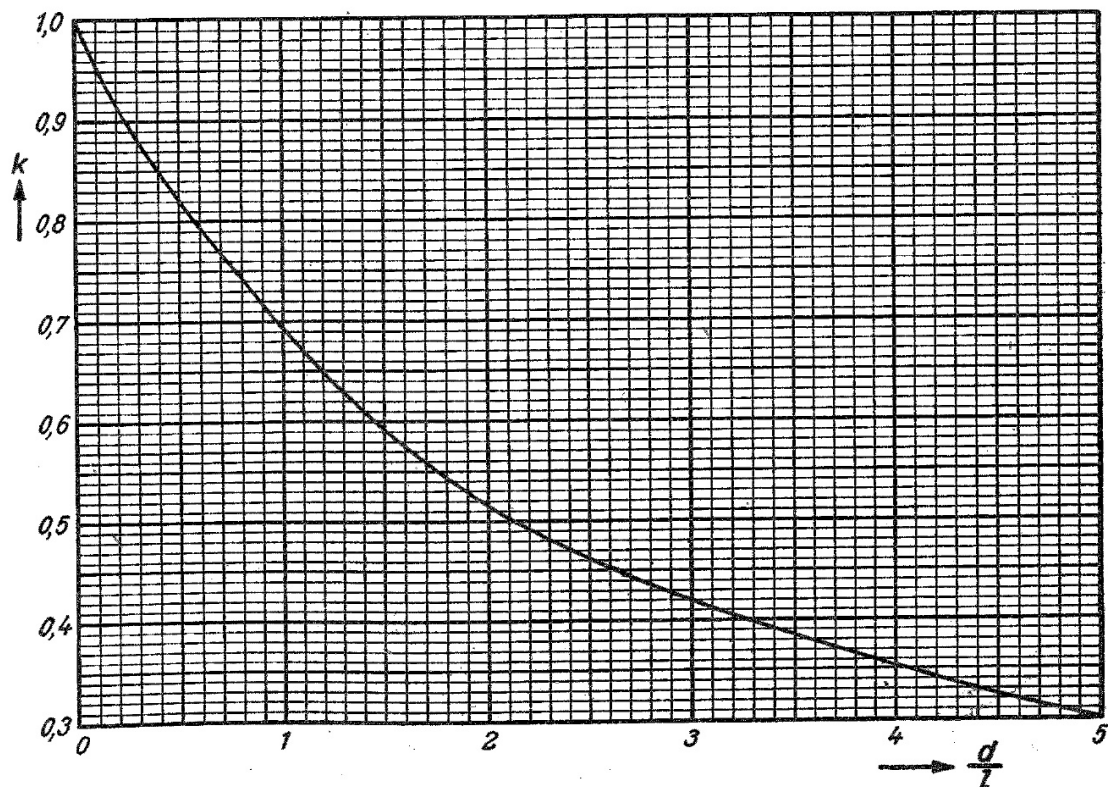
mit der Spulenlänge l und dem Windungsradius $r = D / 2$.

Eine weitaus umfassendere theoretische Abhandlung aus dem Jahr 1937 findet sich [hier](#) und beweist, dass das Thema "Spulenkapazität" in der sich damals rasant entwickelnden Rundfunktechnik schon immer von großer Bedeutung war und dass unsere Altvordenen auf beeindruckende Weise mit Höherer Mathematik umzugehen wussten.

Exakte Ermittlung der Induktivität

Die genaue Berechnung der Induktivität erfordert eine aufwändige Integration über die magnetische Feldverteilung mit Mitteln der Höheren Mathematik, die von meinem Programm verwendeten einfachen Näherungsformeln sind deshalb mehr oder weniger fehlerbehaftet.

Zu Vergleichszwecken habe ich auf die aus /1/ entnommene Kurve zurückgegriffen, aus der ein so genannter **Formfaktor** k als Funktion des Verhältnisses Durchmesser zu Länge abgelesen werden kann:



Die Induktivität ergibt sich hieraus zu:

$$L(\mu H) = \frac{\pi^2 D^2 N^2}{l} 10^{-3} k$$

In meinem Programm habe ich eine approximierende Funktion über obige Kurve gelegt, sodass L für $D/l \leq 5$ ($l/D \geq 0,2$) berechnet werden kann und über den Button "Kontrolle" abrufbar ist.

Zur Spulengüte

Das für die "optimale" Spule gültige Verhältnis $l/D = 0,45$ muss nicht automatisch auch zu einer Spule mit größtmöglicher Güte führen, bei der ja auch die Drahtstärke ([Skinneffekt](#)!) eine große Rolle spielt.

In /2/ findet der mathematisch interessierte OM dazu eine mutige Veröffentlichung, denn leider üben mathematische Formeln heute auf eine wachsende Mehrheit von Funkamateuren eine eher abschreckende Wirkung aus.

Literatur

/1/ Limann, O.; Hassel, W.: Hilfsbuch für Hochfrequenz-Techniker, Bd.1, 2.A. Franzis, 1959

/2/ Zwicky, P., HB9DFZ: Optimierung der Güte einlagiger zylindrischer Luftspulen. FUNKAMATEUR 62 (2013) H.10, S. 1080-1084