

Berechnung verkürzter Dipole

Ist es nicht so, dass echter Ham-Spirit insbesondere durch Basteln und Experimentieren befeuert wird verbunden mit dem Drang die Gesetze der Physik zu erkunden?

Mein Funkfreund Ingo, DL2AAA hatte sich bei seiner abenteuerlichen Reise mit dem Lastenfahrrad quer durch Frankreich entgegen aller Diskussionen in Foren und mit anderen OMs für die Mitnahme eines DP200 Dipols entschieden und nicht für eine chinesische Vertikal, er sei ja schließlich auf dem Campingplatz.

Bedeutung bei der Auswahl hatte außerdem dass er mit dem Dipol viel weniger qrm höre als mit einer Vertikal, beide resonant abgestimmt, die er vorher im direkten Vergleich aufgebaut hatte. Besonders störte ihn, dass für den Betrieb des 30m-Bands ebenfalls die vom Hersteller mitgelieferten 10 μ H-Verlängerungsspulen empfohlen wurden, daher baute er sich eigene Spulen für das 30 m Band um einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erzielen.

Ergebnis unseres interessanten Meinungsaustauschs ist das Tool "Verkürzter Dipol", es beantwortet Fragen nach der optimalen Wahl der Verlängerungsinduktivitäten, der verlustärmsten Anpassung mittels Beta-Match und dem zu erwartenden Wirkungsgrad derartiger Antennen.

Doch jede Software-Simulation bleibt letztendlich wertlos wenn das Ergebnis nicht durch praktische Messungen bestätigt werden kann.

Ehe ich mich also mit Ingos DP200 beschäftigte wollte ich mit dem Programm einen verkürzten Dipol für das 30m-Band entwerfen.

Berechnung eines verkürzten Dipols für das 30m-Band

Der Dipol sollte bei mir zu Hause unter Dach aufgebaut und getestet werden.

Als Spannweite stehen max. nur 6m zur Verfügung, angesichts der Wellenlänge von ca. 30m ist eine starke Verkürzung erforderlich - eine Herausforderung an den Wirkungsgrad!

Bedienanleitung

Einzugeben sind Frequenz ($F=10,1\text{MHz}$), max. Spannweite des Dipols ($2l = 6\text{m}$), Drahtdurchmesser ($d=1\text{mm}$), Güte einer Verlängerungsspule ($QL=150$) und Abstand einer Verlängerungsspule vom Einspeisepunkt des Dipols ($b=0,75\text{m}$).

Gesucht werden Induktivität einer Verlängerungsspule, Induktivität des Beta-Match, Güte der Induktivität des Beta-Match, Länge des Hair-Pin (unter Verwendung halboffener Bandleitung CQ562flex), Wirkungsgrad der Antenne und SWR am Dipoleingang.

Die echte Qual der Wahl hat man eigentlich nur bei der Festlegung des Abstands b einer Verlängerungsspule vom Einspeisepunkt des Dipols.

Vor allem mechanische Gründe sprechen dafür, beide Induktivitäten meist unmittelbar am Einspeisepunkt zu befestigen (DP200 nur 10cm Entfernung).

Im aktuellen Beispiel sind es allerdings 75cm, was hauptsächlich zwei gegenläufige Ursachen hat:

- Durch das Wegrücken der Verlängerungsspulen vom Speisepunkt in Richtung Dipolende steigt der Strahlungswiderstand der Antenne und die Stromverteilung längs des

Antennendrahtes wird für die Abstrahlung von Hochfrequenzenergie günstiger.
Das wirkt sich positiv auf den Wirkungsgrad aus.

- Je weiter die Spule weggerückt wird umso mehr induktiver Widerstand ist erforderlich um den Dipol auf Resonanz zu bringen, d.h., auch die ohm'schen Verluste steigen entsprechend. Das wirkt sich negativ auf den Wirkungsgrad aus.

Ein (ziemlich flaches) Optimum ist dann erreicht, wenn der Abstand b etwa bei $1/3$ der Länge einer Dipolhälfte liegt.

Durch Ändern des Eingabewertes für b und Wiederholung der Berechnungen kann sich jeder selbst ein Bild von den Auswirkungen machen.

The screenshot shows the 'Verkürzter Dipol' software interface. The title bar reads 'Kurzdipol-Rechner 1.1 Testversion'. The main window has a title 'Verkürzter Dipol'. The interface is divided into several sections:

- Input Parameters:**
 - Frequenz (MHz): 10.1
 - Wellenlänge λ (m): 29,703
 - Gesamtlänge (m): 6
 - Drahtdurchmesser d (mm): 1
 - Abstand vom Speisepunkt b (m): 0,75
 - Induktivität (μ H): 13,84
 - Güte QL: 150
 - Blindwiderstand (Ohm): 878,29
- Calculated Results:**
 - Fußpunktimpedanz: RA(Ohm) 23,65, XA(Ohm) -25,45, Soll XA(Ohm) -24,96
 - Strahlungswiderstand Rs(Ohm): 12,36
 - Verlustwiderstand (Ohm): 11,29
 - BetaMatch: Leitung, L(μ H) 0,75, QL 100, XL(Ohm) 47,43
 - Zw(Ohm): 285, VF: 0,813, dB/100m @ F(MHz): 1,09 @ 10,1
 - Länge(m): 0,634
 - Wirkungsgrad (%): 51,98
 - dB: -2,84
 - SWR: 1,02

A 'Start' button is located at the bottom of the interface.

Nach Klick auf "Start" liefert das Programm die gewünschten Ergebnisse:

- Beide Verlängerungsspulen haben jeweils ca. $13,8\mu$ H
- das zur 50Ω -Anpassung erforderliche Beta-Match kann entweder durch Parallelschaltung von $0,75\mu$ H zum Dipoleingang realisiert werden
- oder aber durch ein so genanntes Hair-Pin (Haarnadel), im vorliegenden Fall ist dies ein $0,63$ m langes und am Ende kurzgeschlossenes Stück Bandkabel des Typs CQ562 (normale 300Ω Bandleitung hat fast dieselben Parameter)
- Der Wirkungsgrad der Antenne, d.h. das Verhältnis der am Strahlungswiderstand umgesetzten zur eingespeisten Leistung, beträgt ca. 52% ($2,84$ dB Verlust), das antennenseitige SWR ist ideal (ca. 1,0)

Lasst uns nun einige Aspekte der praktischen Realisierung näher beleuchten:

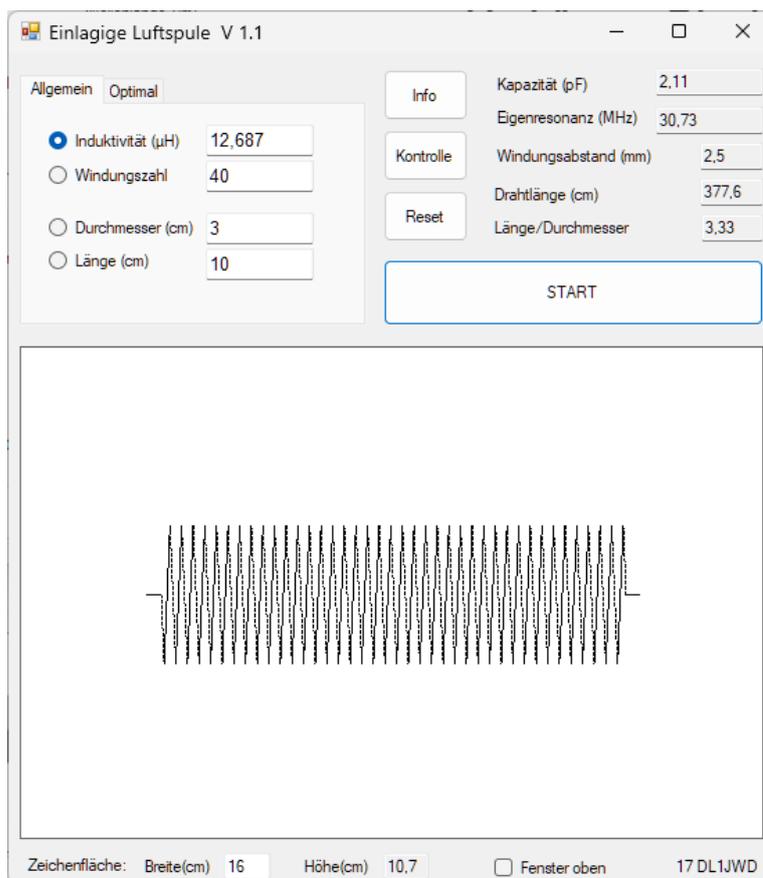
Verlängerungsinduktivitäten als Luftspulen

Die vom Prog berechneten $13,84\mu\text{H}$ beziehen sich auf eine ideale Induktivität, wo parasitäre Einflüsse wie Parallelkapazität und Skineffekt keine wesentliche Rolle spielen. Bei der praktischen Realisierung wird man deshalb i.d.R. feststellen, dass aufgrund von Parallelkapazitäten die wirksame Induktivität deutlich höher liegt, d.h., die Spulen haben mehr Windungen als notwendig, einige müssen deshalb wieder abgewickelt werden.

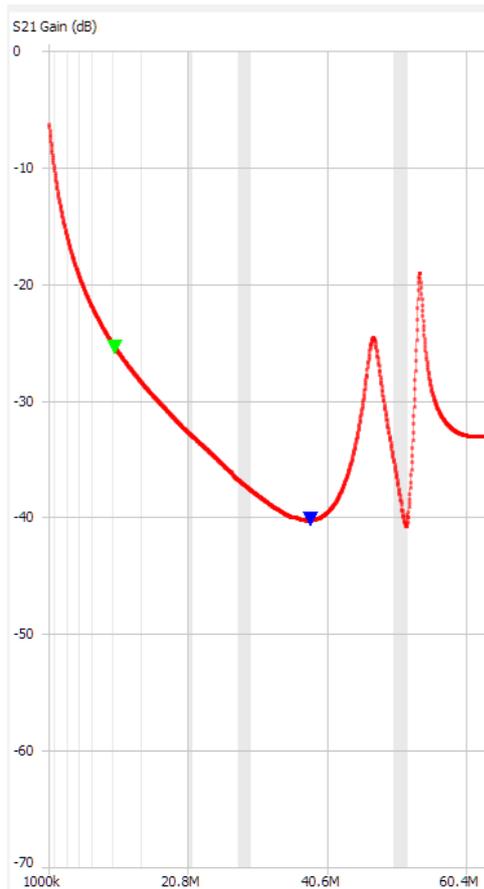
Zunächst hatte ich eine Realisierung der beiden $13,8\mu\text{H}$ Verlängerungsinduktivitäten als Luftspulen geplant, gewickelt auf ein übliches Tablettenröhrchen mit dem Durchmesser $D=3\text{cm}$. Durch Zusammendrücken bzw. Auseinanderziehen der Windungen sollte beim späteren Abgleich eine bequeme Einstellung auf den Sollwert möglich sein.

Zur Grobdimensionierung eignet sich sehr gut das Tool "[Luftspule](#)" (Nr. 17), da dieses auch die Wicklungskapazität und die zu erwartende Höhe der ersten Parallelresonanz abschätzen kann, das allerdings nur ziemlich grob.

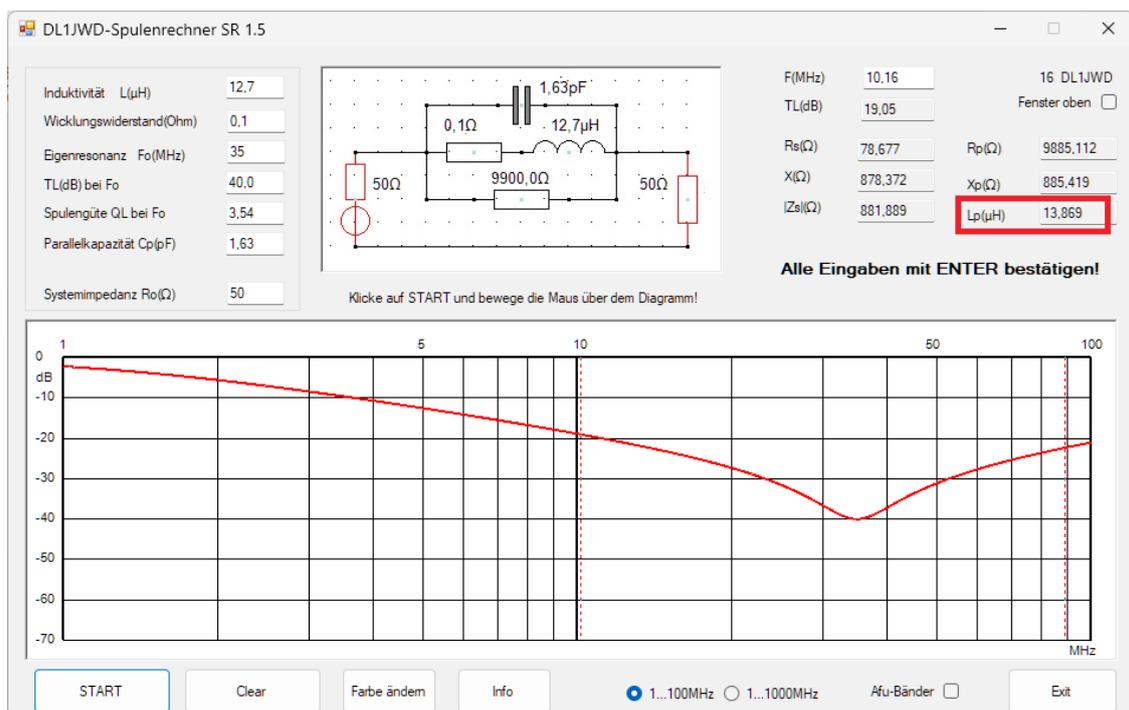
Auf eine Länge $l = 10\text{cm}$ wird mit 40 Windungen eine Induktivität von ca. $12,7\mu\text{H}$ erreicht. Dieser Wert ist zwar etwas kleiner als gefordert, sollte aber genügen, da die wirksame Induktivität bei der Betriebsfrequenz ($10,1\text{MHz}$) aufgrund der Nähe zur ersten Parallelresonanz (ca. 31MHz) deutlich höher liegt.



Den Wert von $12,7\mu\text{H}$ für die Luftspule können wir mit Hilfe eines einfachen LC-Messgeräts (die haben i.d.R. eine sehr niedrige Messfrequenz) abgleichen. Zur genaueren Ermittlung der wirksamen Induktivität (die größer als $10,7\mu\text{H}$ sein wird) ist zunächst eine S_{21} -Messung der Durchgangsdämpfung mit dem NanoVNA durchzuführen:



Naja, der Dämpfungsverlauf sieht zwar nicht ganz so super aus, aber zusammen mit der bei der ersten Parallelresonanz bei 35MHz gemessenen Durchgangsdämpfung von 40dB kann man nun mit dem Tool "[Spulenrechner](#)" (Nr. 16) die bei 10,1MHz wirksame Induktivität ermitteln und erkennt, dass diese etwa dem gewünschten Wert 13,8µH entspricht:



Verlängerungsinduktivitäten auf Ringkernen

Als gute Alternative zur Luftspule bietet sich der Einsatz von Eisenpulver-Ringkernen hoher Güte an (übliche Ferrite sind total ungeeignet!).

Für die vorliegende Antenne fanden sich zufällig zwei gelbe Amidon T106 - 6 in der Bastelkiste ($AL = 11,6 \text{ nH/N}^2$).

Zur Realisierung von $13,84\mu\text{H}$ wären also $\text{Sqrt}(13,84 / 0,0116) = 34,5$ Windungen erforderlich.

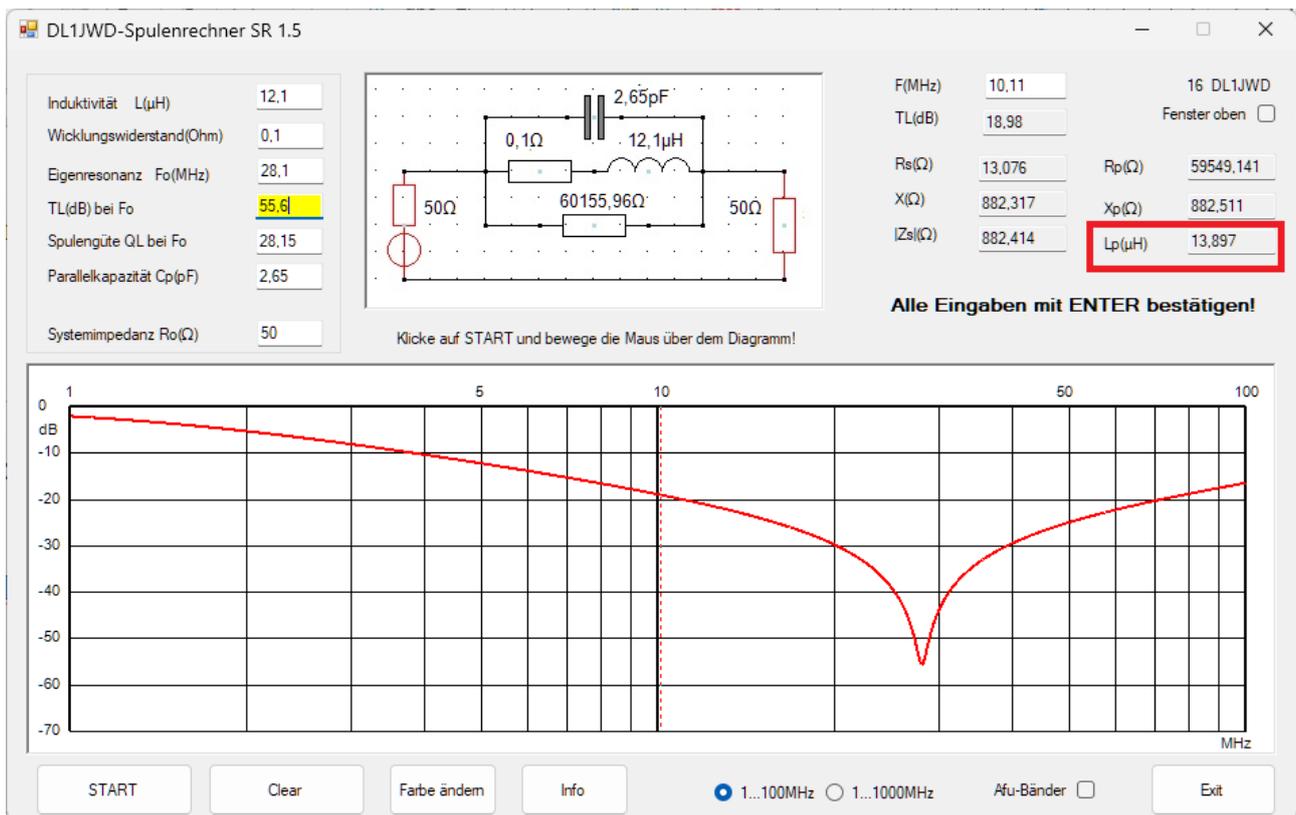
Auf jeden Ringkern passten allerdings nur 32 Wdg (1mm CUL), was lt. LC-Messgerät einen Wert von nur ca. $12\mu\text{H}$ ergab.

Dies aber sollte kein Grund zur Sorge sein, denn die Messung der Durchgangsdämpfung (S21) mit dem NanoVNA bei der ersten Parallelresonanz $28,1\text{MHz}$ lieferte $55,6\text{dB}$:



Im Vergleich mit der Luftspule sieht dieses Diagramm deutlich besser aus.

Das Tool "[Spulenrechner](#)" (Nr.16) zeigt, dass bei $10,1\text{MHz}$ die gewünschte Induktivität ca. $13,8\mu\text{H}$ erreicht wird.



Hinweis

Die für die erste Parallelresonanz F_0 angezeigte Spulengüte ist nicht zu verwechseln mit der Leerlaufgüte QL der Spule bei der Betriebsfrequenz 10.1 MHz, diese beträgt ca. 160 für den Ringkern T106-6.

Wie man QL exakt bestimmen kann ist in der Info-Datei des Spulenrechners erklärt.

Da für das vorliegende Projekt meine Luftspulen insgesamt etwas schwieriger in der Realisierung sind und das sogar bei schlechterer mechanischer und elektrischer Stabilität (man sieht es auch beim Vergleich beider S21-Messungen), fiel die Entscheidung zugunsten der Amido-Ringkerne nicht allzu schwer.



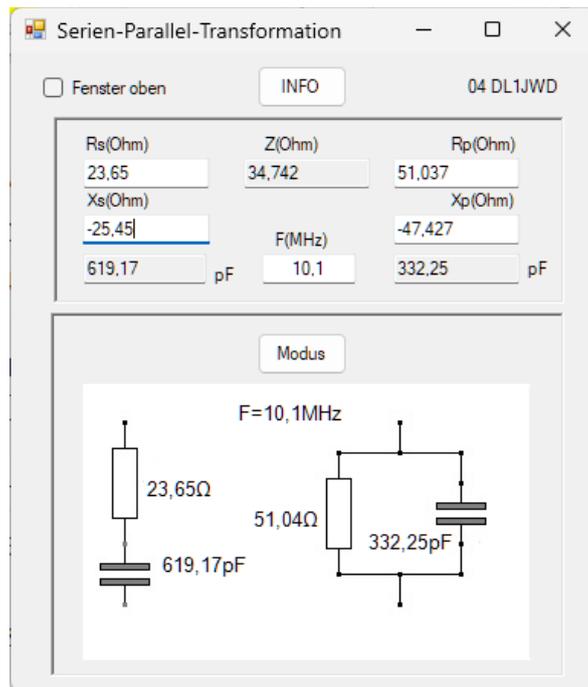
Beta-Match

Verkürzte Dipole haben typischerweise einen kapazitiven, d.h. negativen Blindanteil X_A der Eingangsimpedanz ($Z_A = R_A - jX_A$).

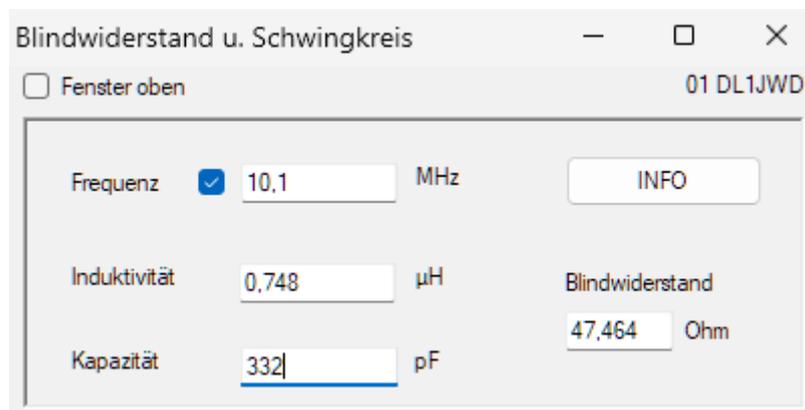
Das Beta-Match ist eine ebenso geniale wie einfache Methode um solche Dipole an den Wellenwiderstand des nachgeschalteten Speisekabels bzw. Baluns anzupassen.

Das Programm hat die Induktivität L_v der Verlängerungsspulen auf iterativem Weg so optimiert, dass der Realteil $R_A = 23,65\text{Ohm}$ der Dipolimpedanz von deren Blindanteil $X_A = -25,45\text{Ohm}$ so genau wie möglich auf 50 Ohm transformiert wird.

Nachrechnen kann das jeder selbst mit dem Tool ["Serien-Parallel-Transformation \(Nr. 4\):"](#)



Das zum Dipoleingang parallel geschaltete Beta-Match ist nichts weiter als eine Induktivität von $0,75\mu\text{H}$, die die bei der Transformation entstandene Parallel-Kapazität von ca. 332pF kompensieren soll:

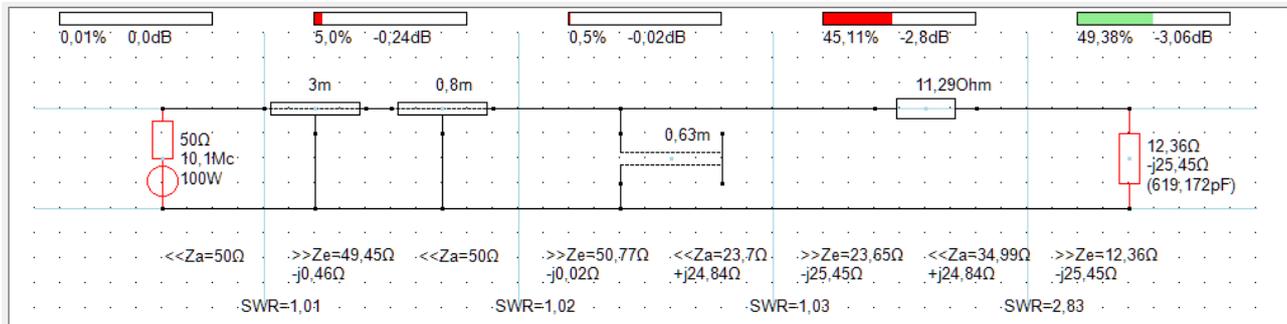


Alternativ kann diese Induktivität auch als am Ende kurzgeschlossenes Kabelstück realisiert werden, was hier aber kaum Einfluss auf den Wirkungsgrad hat.

Abschließende Verlustanalyse des Gesamtsystems

Mit dem Tool "[Kleiner Netzwerkanalysator](#)" (Nr.14) kann die gesamte Berechnung unter Einbeziehung von Speisekabel und Balun genauer unter die Lupe genommen werden.

Das 3m-Speisekabel ist vom Typ RG58, der Balun hat 2x8Wdg RG316U (11dB/100m@10MHz) auf Ferrit-Ringkern FT 140-43 mit einer Wicklungslänge von insgesamt 0,8m.



Angesichts der starken Verkürzung des Dipols ist der Wirkungsgrad von knapp 50% keine Überraschung, dürfte aber gerade noch akzeptabel sein.

Die roten Balken zeigen, dass fast die Hälfte (45%) der Sendeenergie in dem durch beide Verlängerungsspulen verursachten Verlustwiderstand von ca. 11,3Ohm verloren geht. Neben der Strahlerlänge ist also eine hohe Spulengüte wichtigste Voraussetzung für einen hohen Wirkungsgrad!

Hingegen sind die Verluste im Beta-Match (0,5%) vernachlässigbar. In Speisekabel und Balun gehen 5% verloren.

Diese werden nur durch die Grunddämpfung beider Kabel verursacht, denn wegen der ausgangsseitigen 50Ohm-Anpassung (dem Beta-Match sei gedankt) entfallen die SWR-bedingten Zusatzverluste.

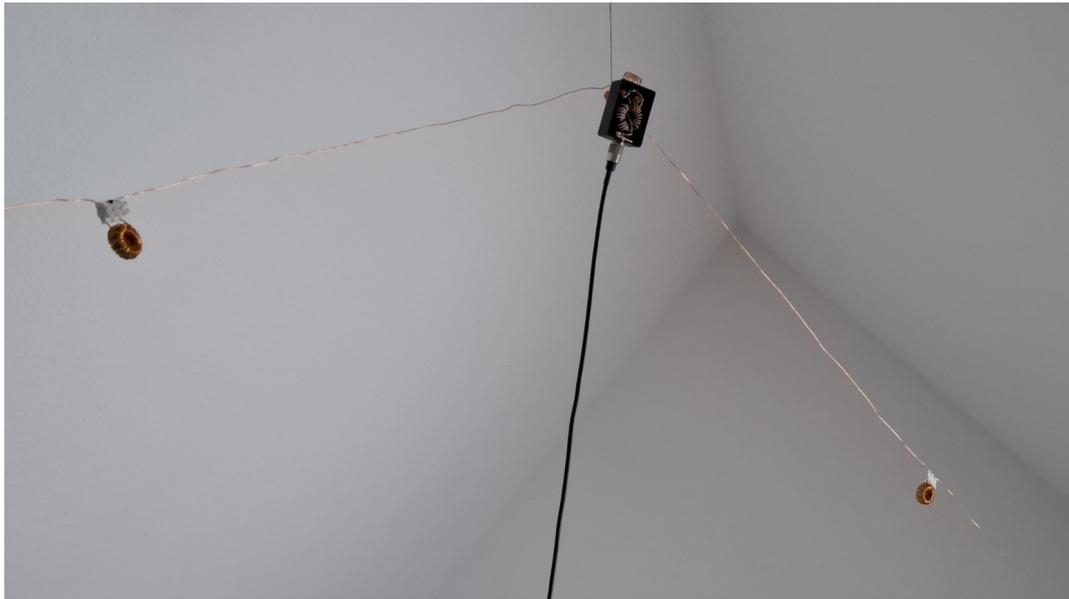
Hinweis

Um in der Simulation möglichst exakte Verlustanalysen zu ermöglichen, sollte man vor dem Bewickeln eines Baluns die Länge der Wicklung zentimetergenau messen. Gleiches gilt für die Länge der Speiseleitung.

Aufbau und Abgleich

Der Aufbau erfolgte als Inverted-V direkt unter dem mit Mineralwolle gedämmten Dach. Am Dipoleingang sind parallel ein 1:1 Strombalun und als Beta-Match die 0,75µH Luftspule angeschlossen (später durch das Bandkabel-Hairpin ausgetauscht).

Das andere Ende des Baluns führte über 3m Speisekabel direkt zum TRX, an dessen Stelle zunächst ein SWR-Meter (NanoVNA) angeschlossen wurde.



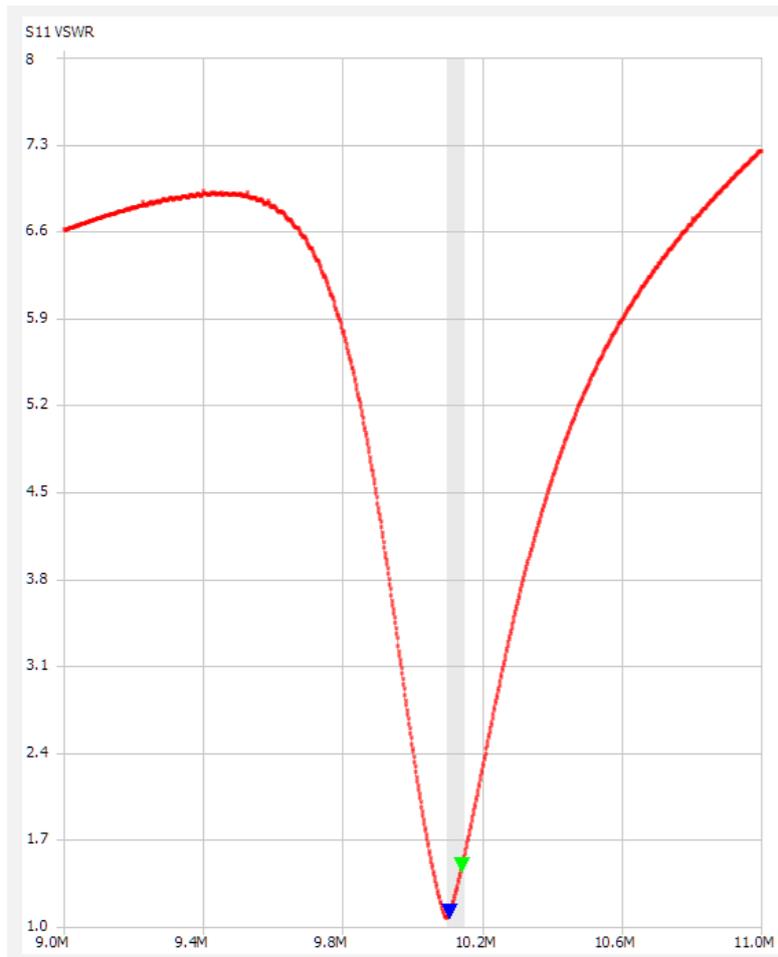
Bei der ersten Messung lag die Resonanzfrequenz zu tief (9,86MHz), was aufgrund der äußeren Bedingungen (Aufbauhöhe 1m bis 3m über Stahlbetonfußboden) nicht verwunderte.

Die notwendige Verkürzung beider Dipoläste um jeweils 17cm war leicht mit dem Tool ["Formelrechner" \(Nr.21\)](#) zu ermitteln:

Parameter	Wert
fo	10,1
fr	9,86
VF	0,95

Ergebnis: **-0.343421766111704**

Nach erfolgter Verkürzung (Einklappen der Dipolenden) konnte durch Auseinanderziehen bzw. Zusammendrücken der Beta-Match-Spule schließlich über das gesamte 30m-Band ein zufriedenstellendes SWR von 1,1 bis 1,5 erreicht werden:



Nach Anschluss des TRX (Pout = 50W) zeigte sich lt. RBN (vor allem in Hauptstrahlrichtung Nord-Süd) eine gute Wellenausbreitung:

spotter	spotted	distance km	freq	mode	type	snr	speed	time	seen
DK9IP-1	DL1JWD	363 km	10105.0	CW	CQ	7 dB	20 wpm	1456z 28 Jun	3 minutes ago
DL0PF	DL1JWD	289 km	10105.1	CW	CQ	11 dB	20 wpm	1456z 28 Jun	3 minutes ago
SE5E	DL1JWD	1028 km	10105.0	CW	CQ	13 dB	20 wpm	1456z 28 Jun	3 minutes ago

Wenn man bedenkt, dass der Dipol unter Dach aufgehängt und sehr stark verkürzt ist (von normalerweise ca. 15m auf nur 6m), kann man durchaus zufrieden sein.

Achtung

Sollte trotz aller Bemühungen ein Abgleich des Dipols auf ein SWR < 1,5 nicht gelingen, so ist der Einsatz eines ATU keine besonders gute Alternative!

Wie sich leicht mit dem Tool "[KNWA](#)" (Nr.14) nachweisen lässt, kann dies aufgrund der Fehlanpassung zu sehr hohen SWR-bedingten Zusatzverlusten in Balun und Speisekabel führen und damit zu einer dramatischen Verschlechterung des Wirkungsgrads des Antennensystems.

Analyse der Antenne DP200 für das 30m Band

Da nun die Tauglichkeit des Tools "Verkürzter Dipol" als Entwurfsgrundlage für derartige Antennen auch praktisch nachgewiesen ist, kann ich mich Ingos DP200 zuwenden.

Im Vergleich mit meinem 6m-Unterdach-Dipol ist seine Antenne fast doppelt so lang, für das 30m-Band ist deshalb ein deutlich höherer Wirkungsgrad zu erwarten.

Ingo hat mir dazu folgende Daten übermittelt:

Strahlerlänge für 10.120 MHz: $2 \times 5,35\text{m} = 10,7\text{m}$
max mögliche Strahlerlänge: $2 \times 5,6\text{m} = 11,2\text{m}$

Strahlerdurchmesser am Anfang: 16mm
" " Ende: 4 mm

Induktivität der 30 m Spule: 3,2uH
Abstand vom Speisepunkt : 10cm

Länge Beta-Match (Hairpin): 42,5cm
Breite " " : 4,8cm
Durchmesser " " : 2mm
Material " " : Edelstahl
Wellenwiderstand " : $Z_w = 120 * \log(2 * D / d) = 465 \text{ Ohm}$

Die erste Analyse zeigt erwartungsgemäß, zumindest für das 30m-Band, für die DP200 einen sehr guten Wirkungsgrad von ca. 90%.

Allerdings sind diese geringen Verluste nur mit Induktivitäten von jeweils 2,6µH zu erreichen, die vom Hersteller mitgelieferten 10µH-Verlängerungsspulen sind eigentlich nur für den 40m-Betrieb dieser Antenne zu akzeptieren, werden aber unverständlicherweise auch für den 30m-Betrieb empfohlen.

Ingos Entscheidung, kleinere Spulen für den 30m-Betrieb einzubauen, war also goldrichtig!

Kurzdipol-Rechner 1.1 Demo

Info 28 DL1JWD

Frequenz (MHz) 10,12 Wellenlänge λ (m) 29,644

Verkürzter Dipol

Symmetrischer Dipol

Gesamtlänge (m) 10,7 Fußpunktimpedanz RA(Ohm) **34,87** Strahlungswiderstand Rs(Ohm) 31,57
 Drahtdurchmesser d(mm) 10 XA(Ohm) **-23,59** Verlustwiderstand(Ohm) 3,3
 Soll XA(Ohm) -22,97

Verlängerungsspulen

Abstand vom Speisepunkt b(m) 0,1 Induktivität(μ H) **2,6** Güte QL 100 Blindwiderstand(Ohm) 165,32

BetaMatch

ohne L Leitung

L(μ H) **1,18** QL 100 XL(Ohm) 75,13

Zw(Ohm) 465 VF 0,95 dB/100m 0,1 @ F(MHz) 10
 Länge(m) **0,718**

Wirkungsgrad(%) 90,51 dB -0,43 SWR **1,02**

Start

Als Ersatz für das unhandliche Hairpin hat Ingo eine kleine Krokokabel Spule eingesetzt, deren Induktivität er lt. Messung mit 2,4 μ H angibt.

Das Programm hingegen hat die erforderliche Induktivität des Beta-Match mit nur 1,18 μ H berechnet, das hinten kurzgeschlossene Stück Koaxkabel müsste dazu eine Länge von ca. 3m haben:

BetaMatch

ohne L Leitung

L(μ H) **1,18** QL 100 XL(Ohm) 75,13

Zw(Ohm) 50 VF 0,66 dB/100m 5 @ F(MHz) 10
 Länge(m) **3,062**

Wirkungsgrad(%) **88,25** dB -0,54 SWR **1,01**

Ziel muss es sein, durch "Spielen" mit verschiedenen Parametern eine maximalen Wirkungsgrad zu erreichen.

Dass es bei den berechneten Werten zu teilweise größeren Abweichungen zur Realität kommt darf nicht verwundern, denn ein theoretisches Modell kann nicht alle in der Praxis auftretenden zusätzlichen Effekte (Bodennähe etc.) erfassen.

Auch sind z.B. die Eigenkapazitäten der Spulen der DP200 nicht berücksichtigt, denn das würde bedeuten, dass die bei Niederfrequenz gemessenen Induktivitäten mit deutlich kleineren Werten in das Programm einzugeben sind.

Letztendlich kann das Tool "Verkürzter Dipol" immer nur eine Startkonfiguration liefern, die dann auf der Basis von Messergebnissen praktisch zu verbessern ist.

Wichtiger Hinweis

Das Programm kann nur "Kurze Dipole" berechnen (Gesamtlänge kleiner als halbe Wellenlänge). Anderenfalls können keine verwertbaren Ergebnisse erscheinen (Anzeige "NaN").

Etwas Theorie

Die Eingangsimpedanz eines verkürzten Dipols berechnet sich einfach aus der doppelten Eingangsimpedanz der entsprechenden Vertikalantenne, deren Strahlerlänge der einer Dipolhälfte entspricht.

Deshalb konnte das im Tool "Verkürzter Dipol" implementierte Berechnungsmodell fast komplett dem Tool "[Verkürzte Vertikalantenne](#)" (Nr. 22) entnommen werden, in dessen Info-Datei alle wesentlichen mathematischen Formeln zu finden sind.

Da beim Dipol die Erdverluste wegfallen, ist natürlich ein deutlich höherer Wirkungsgrad als bei einer Groundplane zu erwarten.

Zum Schluss zwei Beispiele für wichtige Routinen (in C# programmiert):

Sperrwiderstand Rp einer Spule über S21-Messung bestimmen

Diese Routine übernimmt als Parameter die Systemimpedanz Ro (50Ohm) und die z.B. mit einem NanoVNA gemessene Übertragungsdämpfung S21 (dB) bei Parallelresonanz. Rückgabewert ist der Parallelwiderstand Rp.

```
private static double getRp(double Ro, double dB)
// Rp berechnen, der zwischen gleichgroßem Generator- und Lastwiderstand Ro liegt
{
    double vp = Math.Pow(10, -dB / 10); // 0 ... 1
    double p = 4 * Ro;
    double q = p * Ro * (vp - 1) / vp;
    double rp = -p / 2 + Math.Sqrt(p * p / 4 - q);
    return rp;
}
```

Beta-Match berechnen

Diese Routine ist Teil einer iterativen Prozedur, die in kleinen Schritten die Induktivität der Verlängerungsspulen und damit die Eingangsimpedanz des Dipols $Z_A = R_A + jX_A$ verändert, bis X_A den Realteil R_A genau auf den Wellenwiderstand der Speiseleitung $Z_w=50\text{Ohm}$ transformiert. Rückgabewert ist der induktive Widerstand des Beta-Match:

```
private static double getBM(double RA, double XA, double Zw)
// berechnet induktiven Widerstand Xbm des Beta-Match ...
// ... bei Serien-Parallel-Transformation von ZA auf 50Ohm
{
    double xbm = 0;
    double xa = -Math.Sqrt(RA * (Zw - RA)); // anzustrebendes kapazitives XA
    if (xa == XA) // 50Ohm-Transformation ist erreicht
        xbm = -(RA * RA + XA * XA) / XA; // induktive Kompensation
    return xbm;
}
```