

1000 Antennensimulationen

Vortrag für die UKW-Tagung Weinheim 2026-09-12

Alle Rechte an diesen Präsentationsfolien:
Dr. Andreas Krüger, DJ3EI, dj3ei@famsik.de, 2026

Sie dürfen genutzt werden unter der Lizenz CC BY-SA 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



Version 2026-09-11 11:16 UTC

Wer diese Schrift: Impedanz, Strahlungsfeld usw
noch lesen kann, sitzt prima.

Die Folien und das Artikelmanuskript stehen zur Verfügung unter
https://dj3ei.famsik.de/2026-1000_Antennensimulationen
(abtippen oder QR-Code nutzen).



Vortragsankündigung

wie im Tagungsprogramm, hier nur anders formatiert:

Wer ein Antennensimulationsprogramm mit eigener Software steuert (z.B. mit Python-Code), kann 1000 und mehr ähnliche Antennen bequem ausprobieren.

Was geht damit?

- Lehrreiche Parameterstudien: Was passiert eigentlich, wenn ein Dipol kürzer und kürzer gemacht werden muss oder tiefer und tiefer hängt?
- Antennendaten lassen sich aus Analyser-Messwerten erschließen: Wie lang ist die Antenne elektrisch?
- Und Antennen können automatisch optimiert werden, auch für ungewöhnliche, individualistische Vorstellungen, was "optimal" ist.

Fragen?

Dann stellen, wenn sie auftauchen.

Selbstvorstellung

- Ehemals Softwareentwickler, jetzt Rentner.
- Funkamateurl seit 2001.
- Neugieriger „Handampf auf vielen Gassen“.
- Passionierter „Erklärbar“:
u.a. [Vorträge](#), [deutscher Blog](#), [englischer Blog](#), [Fediverse](#)
- Moderator und Webmaster [AfuBarcamp](#)
- Mitarbeiter AJW-Referat DARC
- QRP-Station in der Mietwohnung mit Kompromissantennen

Und Ihr?

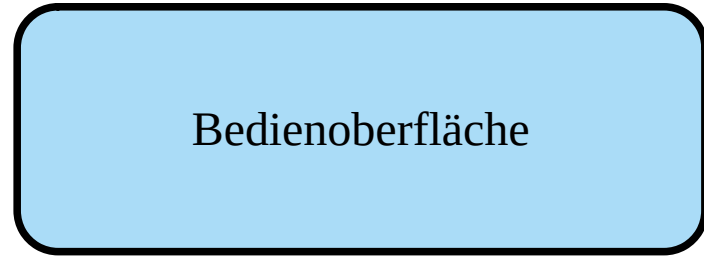
- Wer hat schon mal eine Amateurfunkantenne selbst gebaut?

Und Ihr?

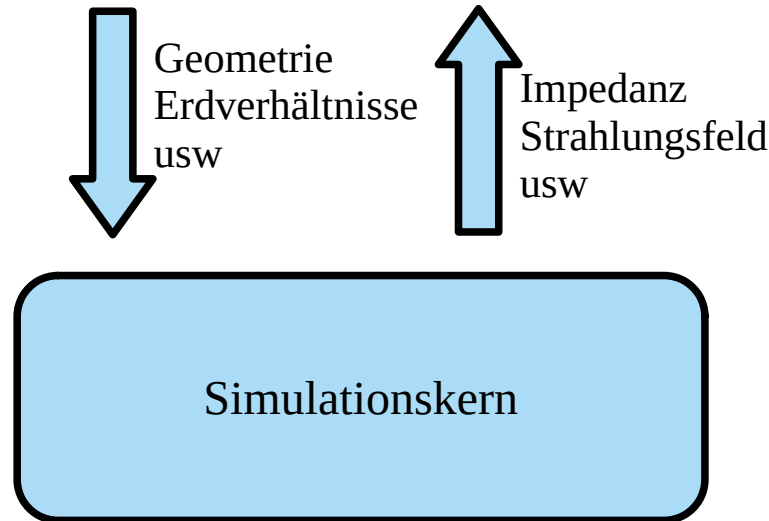
- Wer hat schon mal eine Amateurfunkantenne selbst gebaut?
- Wer hat schon mal eine Amateurfunkantenne selbst simuliert?

Die Softwareseite

Klassische Antennensimulation

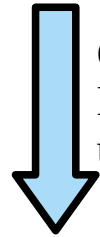
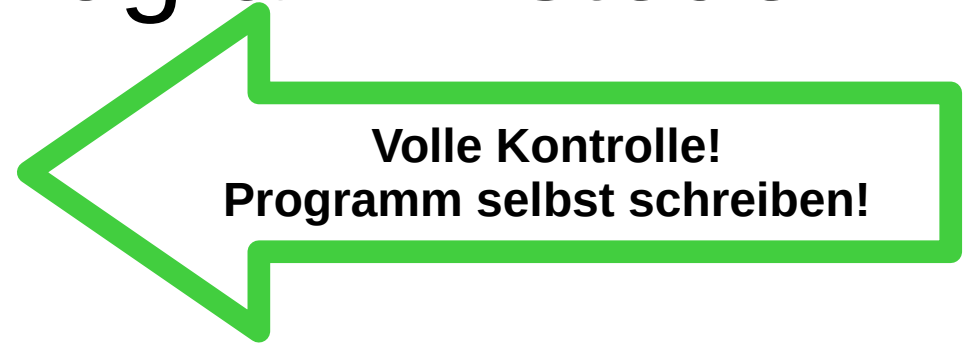


Bedienoberfläche
von 4nec2, EZNec, MMANA, ...:
Mauskontrolle, Menues,
Graphiken, ...

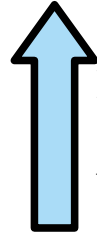


Simulationskern macht
die eigentliche Arbeit

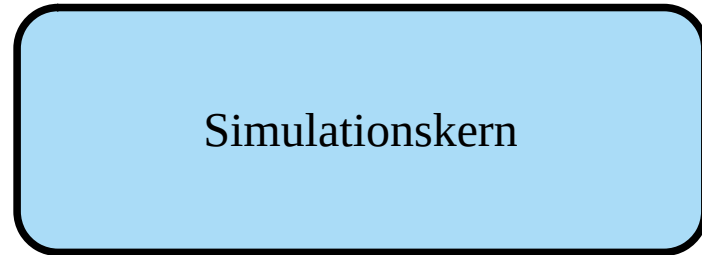
Idee: Kern mit Programm steuern!



Geometrie
Erdverhältnisse
usw



Impedanz
Strahlungsfeld
usw

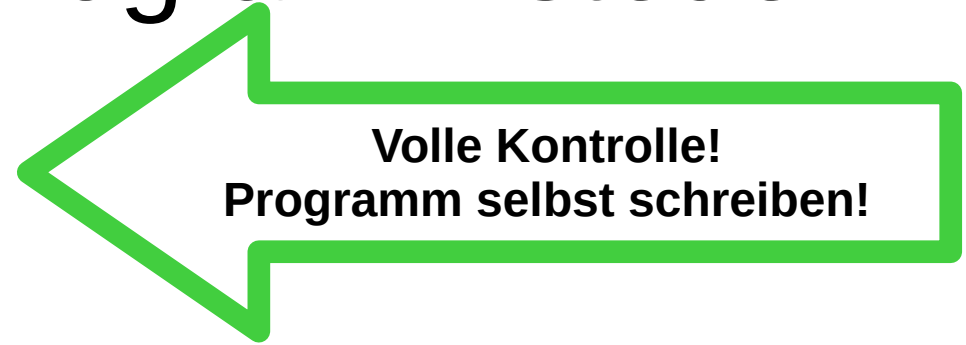
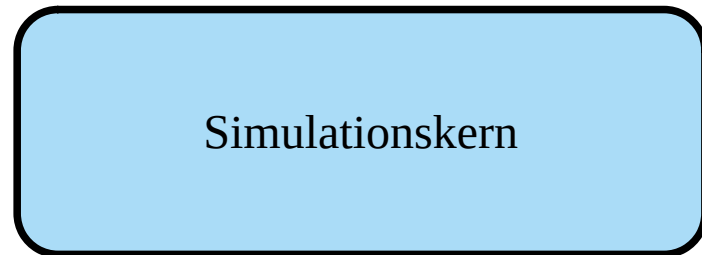


Idee: Kern mit Programm steuern!



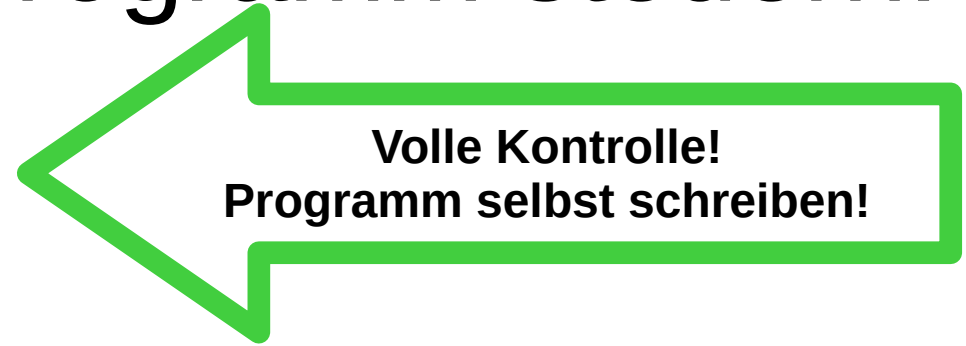
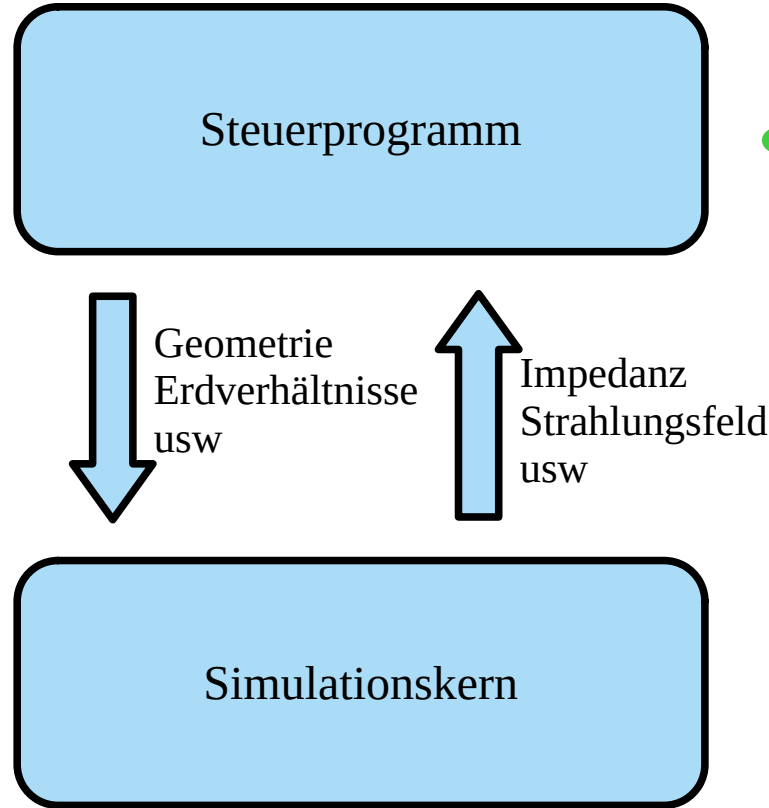
↓
Geometrie
Erdverhältnisse
usw

↑
Impedanz
Strahlungsfeld
usw



Wer von Euch hat schon mal
ein Programm geschrieben
(länger als 2 DIN A4 Seiten)?

Idee: Kern mit Programm steuern!



Wer von Euch hat schon mal
ein Programm geschrieben
(länger als 2 DIN A4 Seiten)?

In Python?

Weitere Werkzeuge

- Jupyter Notebook
Python-Code und dokumentierenden Klartext
mischen und veröffentlichen.

Üblich in vielen Jupyter Notebooks, auch in meinen:

- Pandas
Datenanalyse und Diagramme malen
- Scipy
Bietet u.a. fertige Algorithmen für das Optimieren

**Ich will Lust auf Selbstmachen wecken:
Notebooks für alles hier im Vortrag sind veröffentlicht
und sollten auf normalen Rechnern nachvollziehbar sein.**

Die Softwareseite



(Mit meiner Software nehme ich
am Selbstbauwettbewerb teil,
meine Einreichung siehe Webseite.)

Wie geht es weiter?

- Lehrreiche Parameterstudien
- Antennen automatisch optimieren.
- Antennendaten aus Messwerten erschließen.

Andere Reihenfolge gegenüber der Ankündigung

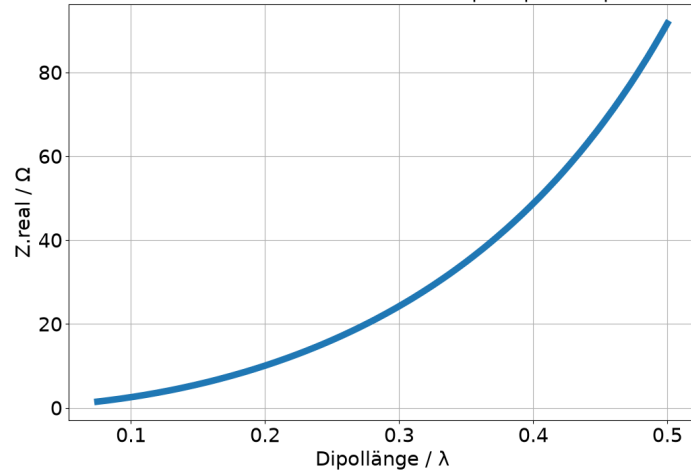
Lehrreiche Parameterstudie:

Was passiert,
wenn ein Dipol immer kürzer wird?

Das interessiert mich als Mietshausbewohner
mit wenig Platz für Antennen.

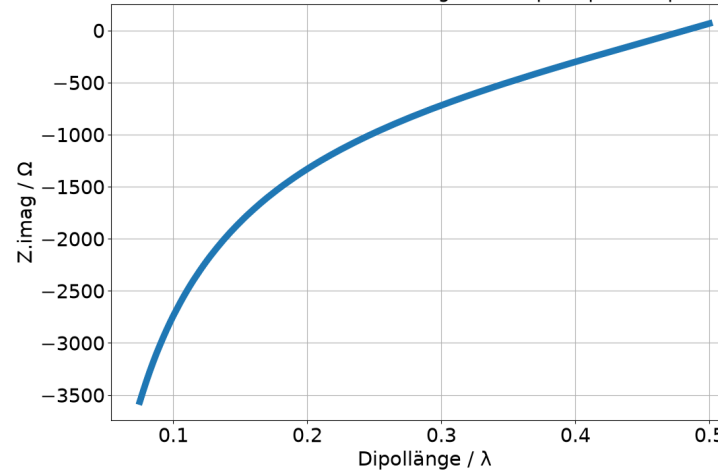
Kleines R in Serie mit kleinem C

Kurzdipole aus Kupferdraht von 1 mm Durchmesser bei 7100 kHz,
10 m über durchschn. Grund: Realteil Speisepunktimpedanz



Der Strahlungswiderstand wird immer kleiner, bis in den Bereich einstelliger Ω -Werte.

Kurzdipole aus Kupferdraht von 1 mm Durchmesser bei 7100 kHz,
10 m über durchschn. Grund: Imaginärteil Speisepunktimpedanz



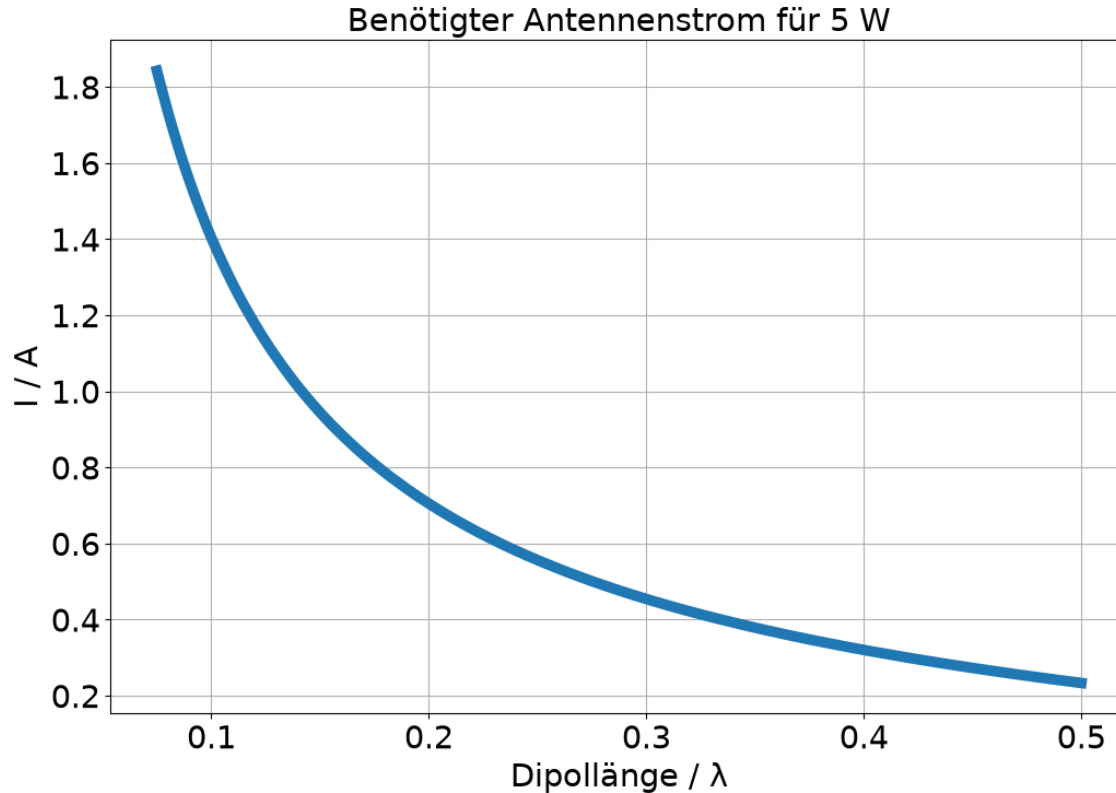
Der Strahlungswiderstand liegt in Serie mit einem Kondensator mit immer weiter steigenden Scheinwiderstand (bis in den k Ω -Bereich).

Beispielwerte Speisepunktimpedanz bei verschiedenen Gesamt-Dipollängen:

0.500 λ :	91.6 Ω	66.6j Ω
0.450 λ :	67.0 Ω	-116.5j Ω
0.400 λ :	48.7 Ω	-301.5j Ω
0.350 λ :	34.8 Ω	-498.1j Ω
0.300 λ :	24.2 Ω	-718.7j Ω
0.250 λ :	16.1 Ω	-983.4j Ω
0.200 λ :	10.1 Ω	-1329.6j Ω
0.150 λ :	5.6 Ω	-1838.0j Ω
0.100 λ :	2.5 Ω	-2739.0j Ω
0.075 λ :	1.5 Ω	-3563.5j Ω

Graphen aus 171 Simulationen.

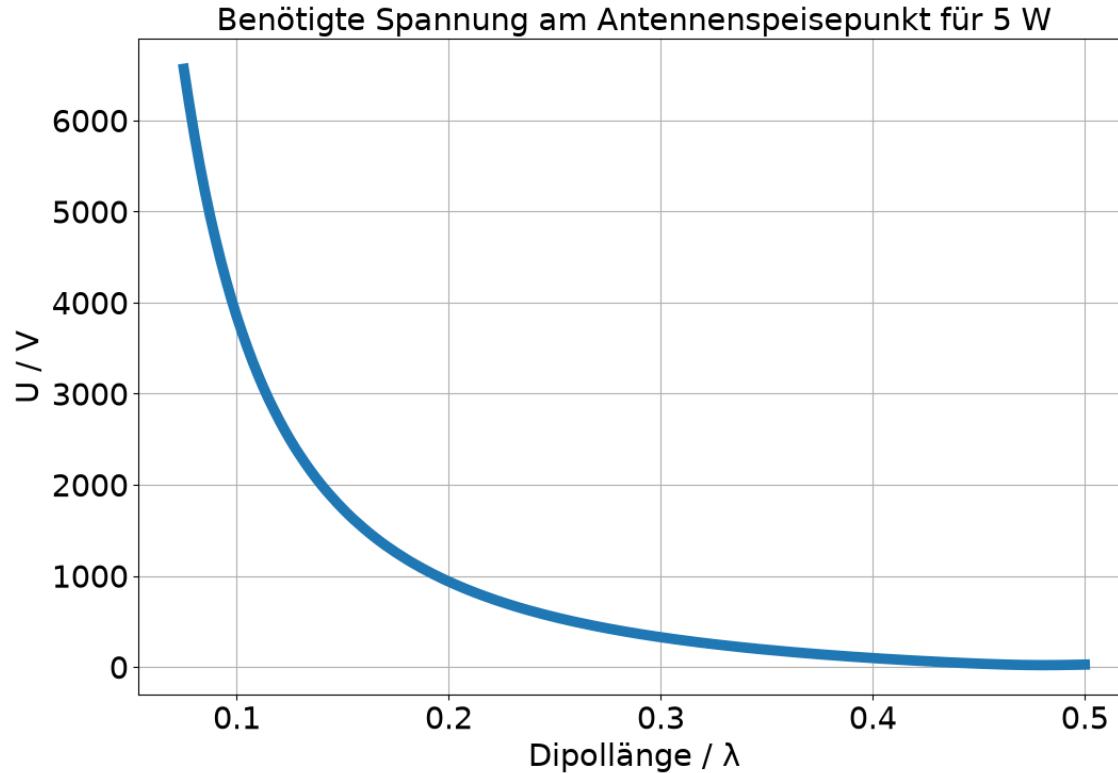
Strom für 5 W Leistung selbe Antennen



Beispielwerte Dipollänge / λ
und nötiger Speisestrom / A,
um nur 5 W Leistung
an den Dipol abzugeben:

0.500	0.23
0.450	0.27
0.400	0.32
0.350	0.38
0.300	0.45
0.250	0.56
0.200	0.71
0.150	0.94
0.100	1.40
0.075	1.84

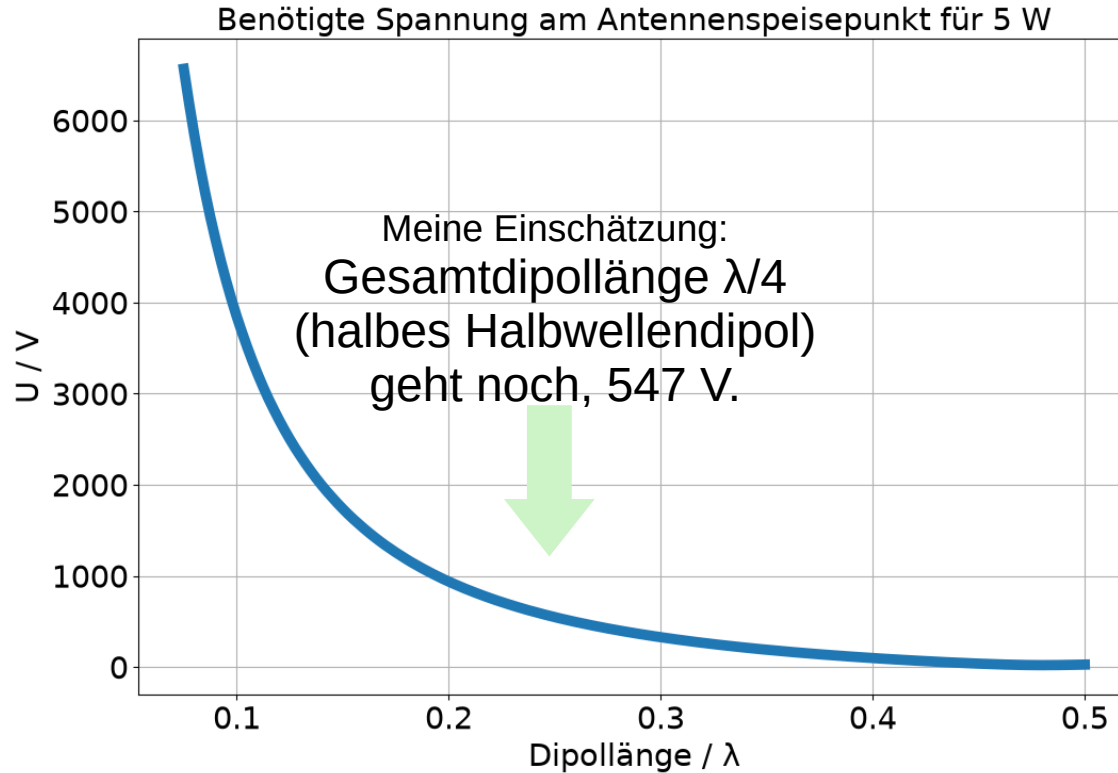
Spannung für 5 W Leistung selbe Antennen



Beispielwerte Dipollänge / λ
und nötige Speisespannung / V,
um nur 5 W Leistung
an den Dipol abzugeben:

0.500	26
0.450	37
0.400	98
0.350	189
0.300	327
0.250	547
0.200	938
0.150	1736
0.100	3845
0.075	6567

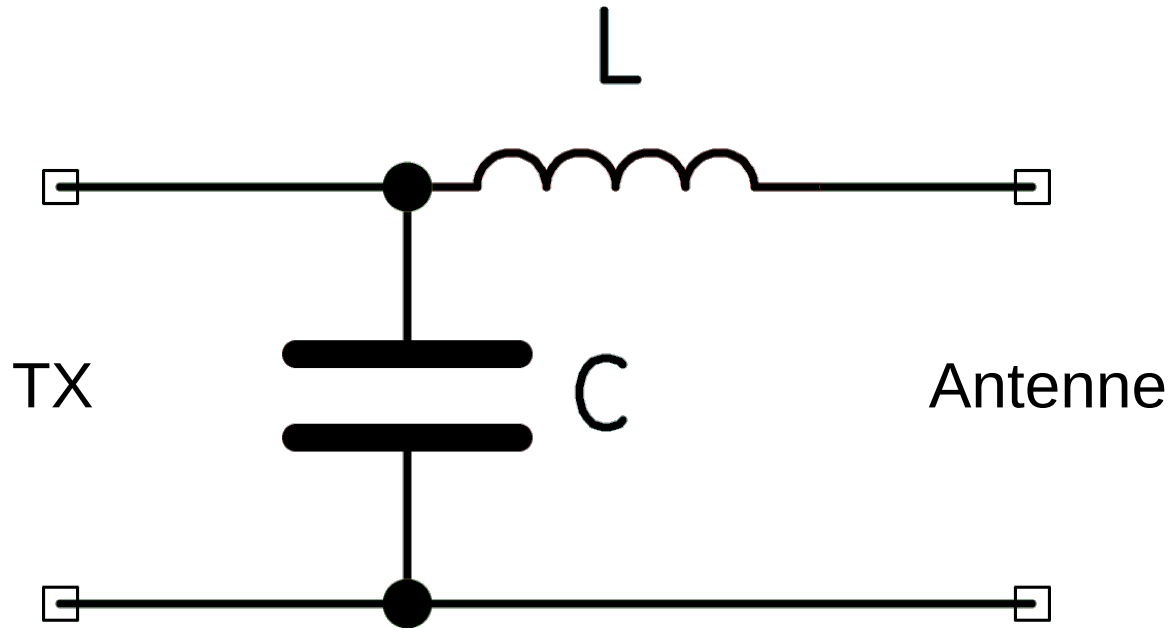
Spannung für 5 W Leistung selbe Antennen



Beispielwerte Dipollänge / λ
und nötige Speisespannung / V,
um nur 5 W Leistung
an den Dipol abzugeben:

0.500	26
0.450	37
0.400	98
0.350	189
0.300	327
0.250	547
0.200	938
0.150	1736
0.100	3845
0.075	6567

Hier hilft ein schlichter Tuner



Die Spule ergänzt das C der Antenne zu einem Serienschwingkreis, der die benötigte Hochspannung erzeugt.

Nach (geringer) Vergrößerung von L und mit passendem Tuner-C: Transformation auf 50 Ω .

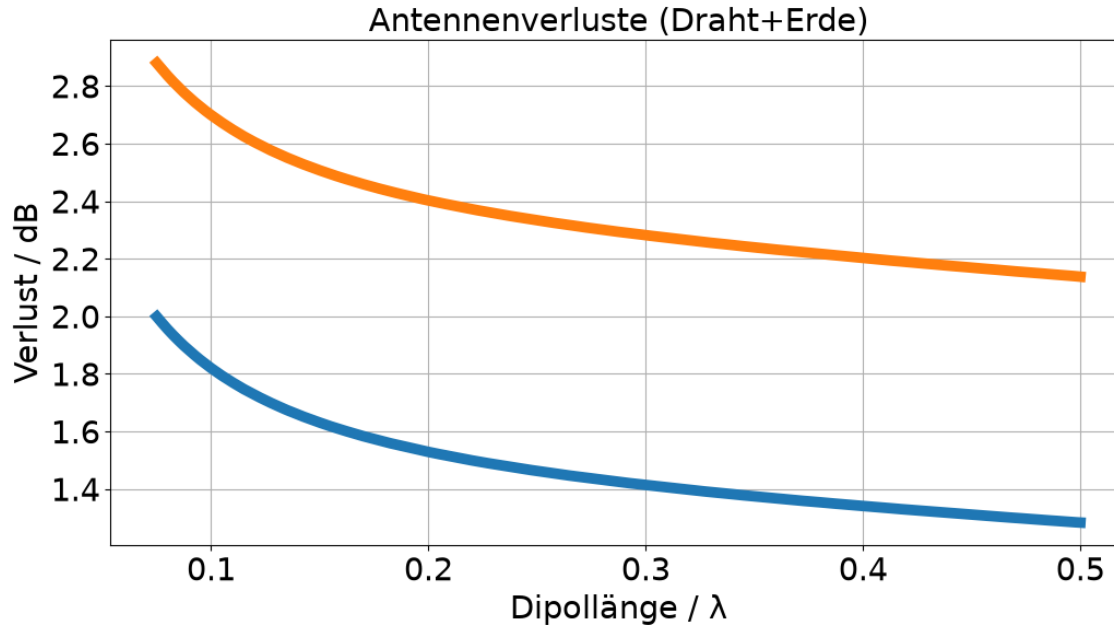
Wie viele von Euch...

- nutzen auf der Kurzwelle häufig Tuner?

Wie viele von Euch...

- nutzen auf der Kurzwelle häufig Tuner?
- arbeiten auf der Kurzwelle fast nur mit resonanten Antennen?

Verluste kurzer Antennen



Obere Linie: „city ground“, untere: „average ground“.

Zusätzliche Draht- und Erdverluste durch Antennenverkürzung bis 0,7 dB: Erträglich. (Bei 10 m Höhe über Grund.)

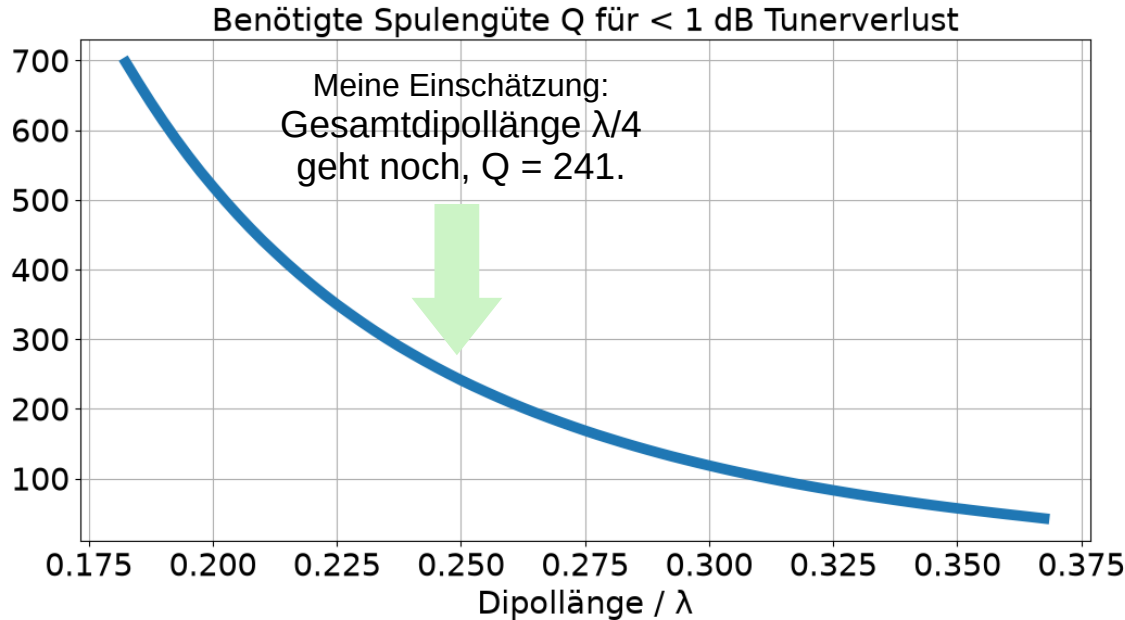
Beispielwerte Dipollänge / λ und Dämpfung (Draht+Erde) in dB, erste Zahl durchschnittlicher Boden, zweite Zahl (schlechter) Innenstadtboden:

0.08	2.0	2.8
0.12	1.7	2.6
0.16	1.6	2.5
0.20	1.5	2.4
0.24	1.5	2.3
0.28	1.4	2.3
0.32	1.4	2.3
0.36	1.4	2.2
0.40	1.3	2.2
0.44	1.3	2.2
0.48	1.3	2.1

Tunerverluste? 🤔

Hängen ab von der Güte Q der verwendeten Spule.

Spulengüte für Verlust < 1 dB



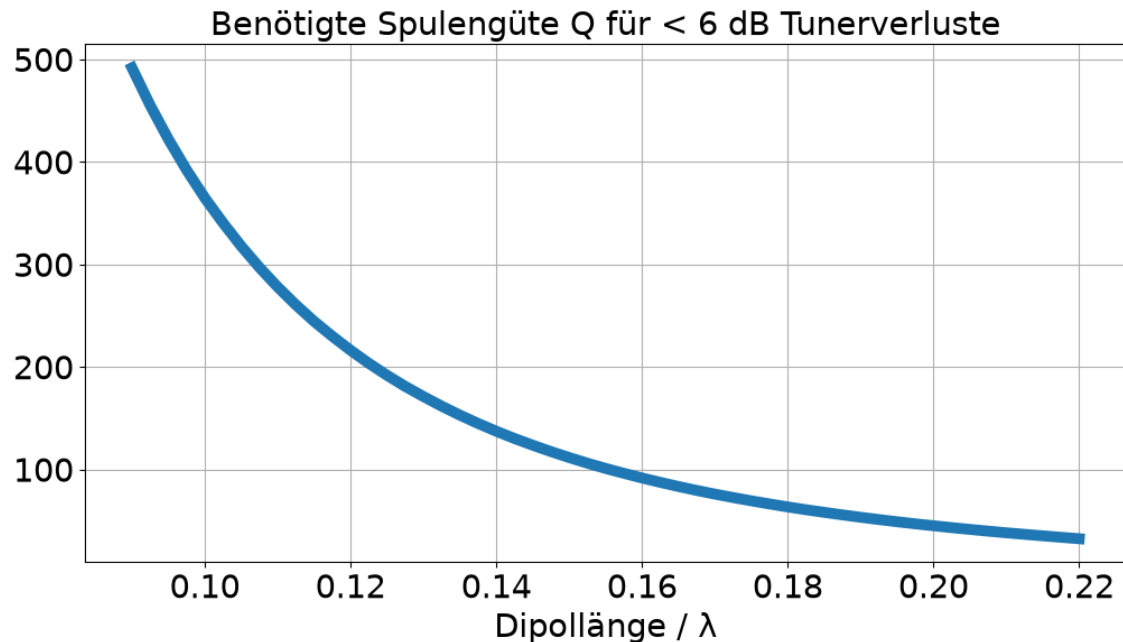
Beispielwerte Dipollänge / λ
und nötige Güte Tunerspule
für Tunerverluste von 1 dB:

0.10	4188
0.12	2480
0.14	1574
0.16	1051
0.18	728
0.20	519
0.22	378
0.24	279
0.25	241
0.26	209
0.28	157
0.30	118
0.32	89
0.34	67
0.36	49

$\lambda/4$ – Dipole und längere führen zu realistischen
Spulengüten. Bei kürzeren Dipolen wird es schwierig.

Kompromissdipole: 6 dB

Motto: „Lieber $\frac{3}{4}$ der Sendeleistung im Tuner wegheizen als gar nicht QRV sein.“



Beispielwerte Dipollänge / λ
und nötige Güte Tunerspule
für Tunerverluste von 6 dB:

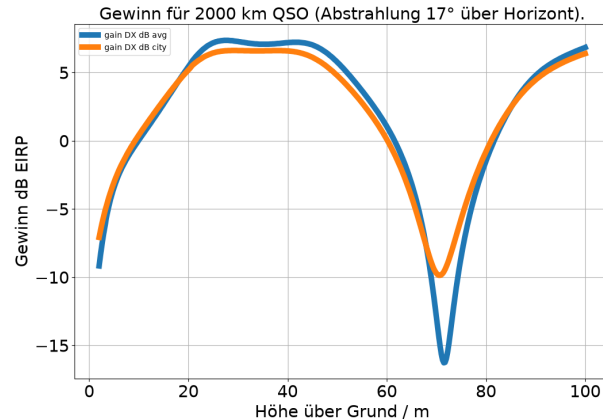
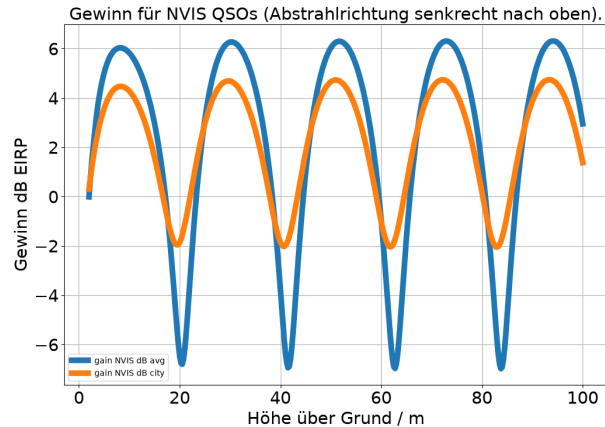
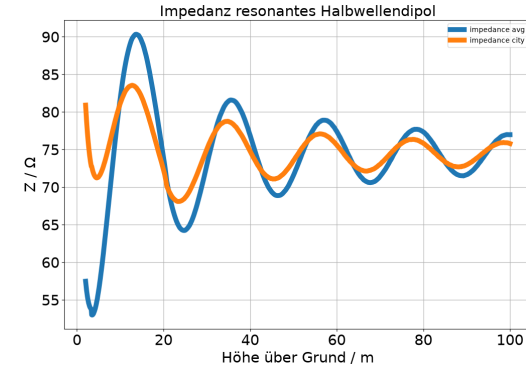
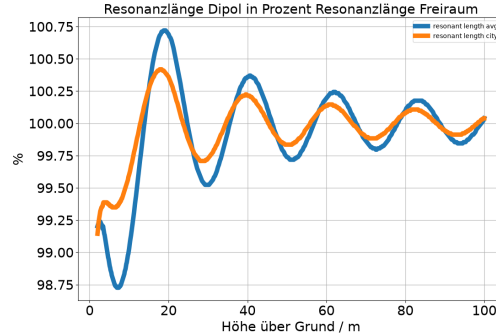
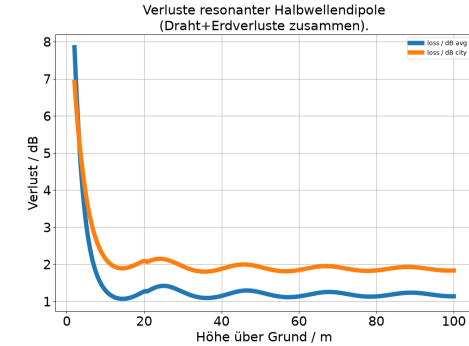
0.08	683
0.09	492
0.10	365
0.11	278
0.12	216
0.13	171
0.14	137
0.15	112
0.16	92
0.17	76
0.18	63
0.19	53
0.20	45
0.21	38
0.22	32

Lehrreiche Parameterstudie:

Was passiert,
wenn ein Dipol immer kürzer wird?



Nachschlag: Noch eine Parameterstudie: Halbwellendipole mal höher, mal tiefer.



Nicht im Tagungsband!

[Blogpost](#) auf englisch,
von der Vortragsseite verlinkt.

Antennen automatisiert optimieren: Wir (er)finden die ZS6BKW!

Die klassische ZS6BKW:

- Die ZS6BKW ist eine etablierte Antenne für 5 KW-Bänder: 40 m, 20 m, 17 m, 12 m, 10 m – und zufällig sogar für 6 m!
- Erfunden um 1987.
- Quelle: Brian Austin, G0GSF (ex ZS6BKW):
„[The ZS6BKW Antenna – from the horse's mouth](#)“, Sprat #130
- Bauplan:
mittengespeister Dipol + 400 Ω Hühnerleiter (HL)
- Der Trick: Geschickt gewählter Längen: 28,5 m Dipol, 13,3 m HL.

Die ZS6BKW

Vergleich der publizierten ZS6BKW und dem, was unser NEC2 heute rauskriegt.

f_b : Beste Frequenz, SWR_b : SWR bei f_b , B: Bandbreite $SWR < 2$.

	pub	heute sim
Dipolspannweite / m	28,5	28,5
Hühnerleiter / m	13,3	13,3
40 m: f_b / MHz	7,10	7,115
40 m: SWR_b	1,1	1,01
40 m: B / kHz	360	347
20 m: f_b / MHz	14,20	14,342
20 m: SWR_b	1,1	1,08
20 m: B / kHz	270	247
17 m: f_b / MHz	18,10	18,125
17 m: SWR_b	1,3	1,08
17 m: B / kHz	380	393

	pub	heute sim
12 m: f_b / MHz	24,92	25,099
12 m: SWR_b	1,4	1,49
12 m: B / kHz	260	231
10 m: f_b / MHz	28,97	29,127
10 m: SWR_b	1,4	1,16
10 m: B / kHz	400	436
6 m: f_b / MHz	51	51,258
6 m: SWR_b	1,5	1,18
6 m: B / kHz		481

Erster Eindruck: „heute sim“ etwas zu hoch.

Können wir das auch?

- Plan: Wir stellen diese Aufgabe einen Optimierungsalgorithmus
- der sucht nach der „goldenen Nadel im Heuhaufen“.
- Kommt wieder die ZS6BKW dabei heraus?

Der Auftrag an den Optimierungsalgorithmus

- Der Suchbereich:
Hühnerleiter Länge im Bereich 1-40 m
und mittengespeister Dipolspannweite im Bereich 6-100 m.
- Ziel: SWR bei den fünf von Brian angegebenen Frequenzen gleichzeitig minimieren.
$$\sum_i (SWR_i - 1)^2$$
- Benutzter Algorithmus:
[scipy.optimize.differential_evolution](#)
- Programmiertrick: Um die optimale HL-Länge für eine Dipolspannweite zu finden, braucht keine Antennensimulation angekurbelt zu werden, das geht so:
Zwei geschachtelte Optimierungen über je 1 Parameter als eine Optimierung über 2 Parameter.

Der Algorithmus findet die ZS6BKW!

Nach 2 Minuten Rechenzeit und 1141 Antennensimulationen:

	pub	gefunden
Dipolspannweite / m	28,5	28,787
Hühnerleiter / m	13,3	13,329
40 m: f_b / MHz	7,10	7,073
40 m: SWR _b	1,1	1,00
40 m: B / kHz	360	346
20 m: f_b / MHz	14,20	14,244
20 m: SWR _b	1,1	1,05
20 m: B / kHz	270	246
17 m: f_b / MHz	18,10	18,028
17 m: SWR _b	1,3	1,06
17 m: B / kHz	380	393

	pub	gefunden
12 m: f_b / MHz	24,92	24,917
12 m: SWR _b	1,4	1,55
12 m: B / kHz	260	214
10 m: f_b / MHz	28,97	28,982
10 m: SWR _b	1,4	1,12
10 m: B / kHz	400	439
6 m: f_b / MHz	51	51,028
6 m: SWR _b	1,5	1,15
6 m: B / kHz		481



Ein Problem des Optimierungsalgorithmus 🙄

- Leider merkt er sich den besten gefundenen Wert nicht
- sondern kommt manchmal mit einem ziemlich guten, aber *etwas* schlechteren Wert als Endergebnis raus.
- Dem kann leicht abgeholfen werden, indem sich der eigene Code den besten Wert merkt.

Ich hab manchmal komische Ergebnisse 🤔 bekommen, bis ich das verstanden hatte.

Ein Verdacht...

- Bandbreite bei der von mir gefunden Antenne meist geringfügig schmaler,
- dabei Antenne etwa 1% länger.



Habe ich einen dünneren Draht benutzt als Brian?

Indizien

- Brian sagt in der Veröffentlichung nichts über den Drahtdurchmesser.
- Ich benutze für Antennenexperimente gerne auseinandergezogene Lautsprecherlitze aus dem Baumarkt, Durchmesser 1 mm. Die habe ich auch in der Simulation eingesetzt.

Antennenparameter indirekt messen



Als ich den Vortrag ankündigte,
hatte ich noch vor, *Längen* zu messen.
Statt dessen messe ich jetzt *Drahtdurchmesser*.



Das ist hoffentlich noch interessanter!

Neuer Auftrag an den Optimierungsalgorithmus

- Der Suchbereich:
Hühnerleiter Länge im Bereich 1-40 m
und mittengespeister Dipol Spannweite im Bereich 26-30 m
und Drahtdurchmesser im Bereich 0,5-5 mm.
- Ziel: SWR bei den fünf von Brian angegebenen Frequenzen
nicht minimieren, sondern Brians SWR Werte reproduzieren.
- Benutzter Algorithmus wie oben.

$$\sum_i (SWR_i - SWR_{Brian_i})^2$$

1,97 mm Durchmesser!

	pub	meine 1 mm	SWR reprod. 1,97 mm
Dip / m	28,5	28,78	28,56
HL / m	13,3	13,33	13,44
f / MHz	SWR	SWR	SWR
7,10	1,1	1,11	1,13
14,20	1,1	1,27	1,11
18,1	1,3	1,29	1,33
24,92	1,4	1,55	1,42
28,97	1,4	1,13	1,37

Mit einem Drahtdurchmesser von 1,97 mm lassen sich Brians SWR-Werte sehr gut reproduzieren!



Hier könnte die
Geschichte zu Ende sein.

Noch eben
die optimale Antenne
mit 1,97 mm Drahtdurchmesser
(niedrigstes SWR, nicht SWR wie Brian).

Die beste Antenne

	pub	meine 1 mm	SWR reprod. 1,97 mm	„beste“ 1,97 mm
Dip / m	28,5	28,78	28,56	28,57
HL / m	13,3	13,33	13,44	13,41
f / MHz	SWR	SWR	SWR	SWR
7,10	1,1	1,11	1,13	1,14
14,20	1,1	1,27	1,11	1,09
18,1	1,3	1,29	1,33	1,28
24,92	1,4	1,55	1,42	1,45
28,97	1,4	1,13	1,37	1,35

(Hier hatte ich zunächst Probleme, weil der Algorithmus zwar an einer besseren Antenne vorbeigekommen war, aber eine schlechtere als Endergebnis herausgab.)

Und weiter?

Dieser Vortrag will ausdrücklich Lust darauf machen, selbst mit diesen Dingen herum zu spielen.

Die Jupyter Notebooks zu diesem Vortrag sind im „Schaufenster“ der Software veröffentlicht, einschließlich Hinweisen, wie das alles ans Laufen zu kriegen ist. Das Schaufenster ist von der Vortragsseite verlinkt. Zur Vortragsseite: Siehe QR-Code oder direkt https://dj3ei.famsik.de/2026-1000_Antennensimulationen

Fragen dazu können gerne zum Beispiel [im Matrix-Chat „Programmierung“](#) des Matrix-Servers <https://chat.darc.de> gestellt werden. (Wer im DARC Mitglied ist, hat dort einen Account.)





Danke für die Aufmerksamkeit!

Dieser Vortrag will ausdrücklich Lust darauf machen, selbst mit diesen Dingen herum zu spielen.

Die Jupyter Notebooks zu diesem Vortrag sind im „Schaufenster“ der Software veröffentlicht, einschließlich Hinweisen, wie das alles ans Laufen zu kriegen ist. Das Schaufenster ist von der Vortragsseite verlinkt. Zur Vortragsseite: Siehe QR-Code oder direkt https://dj3ei.famsik.de/2026-1000_Antennensimulationen

Fragen dazu können gerne zum Beispiel [im Matrix-Chat](#) „Programmierung“ des Matrix-Servers <https://chat.darc.de> gestellt werden. (Wer im DARC Mitglied ist, hat dort einen Account.)

