

Verkürzungsfaktor bei Antennen und Koax-Leitungen

Vielleicht haben Sie sich beim Bau von Antennen oder Umwegleitungen auch schon gefragt, woher eigentlich der Verkürzungsfaktor stammt. Dieser Bericht beschreibt zwei Experimente zum Verkürzungsfaktor, welche einen kleinen Beitrag zum Verständnis dieses wichtigen Faktors in der HF-Technik leisten sollen.

1 Grundlagen

Damit die nachfolgenden zwei Experimente verstanden werden können, wiederhole ich einige wichtige physikalische Grundlagen. Mit Hilfe eines Oszilloskopes und eines HF- oder Funktionsgenerators können Sie diese Grundlagen experimentell nachvollziehen.

1.1 Ausbreitungsgeschwindigkeit, Wellenlänge und Frequenz

Ausbreitungsgeschwindigkeit, Wellenlänge und Frequenz sind voneinander abhängige Größen. Nachfolgend wird diese Abhängigkeit erklärt.

1.1.1 Ausbreitungsgeschwindigkeit

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit beschreibt, wie schnell sich ein Signal fortpflanzt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit wird mit dem Buchstaben c abgekürzt. Eine elektromagnetische Welle breitet sich im Vakuum mit 299'792'458 m/s aus. In der Praxis können wir mit 300'000 km/s rechnen.

1.1.2 Wellenlänge

Die Wellenlänge beschreibt die Länge einer vollständigen Schwingung oder etwas allgemeiner: Die Wellenlänge ist der kleinste Abstand zweier phasengleicher Punkte einer Welle. Die Wellenlänge wird mit dem Buchstaben λ (Lambda) abgekürzt.

1.1.3 Frequenz

Die Frequenz beschreibt allgemein die Anzahl Ereignisse in einem bestimmten Zeitraum. Für unsere Betrachtungen entspricht ein Ereignis einer vollständigen Schwingung.

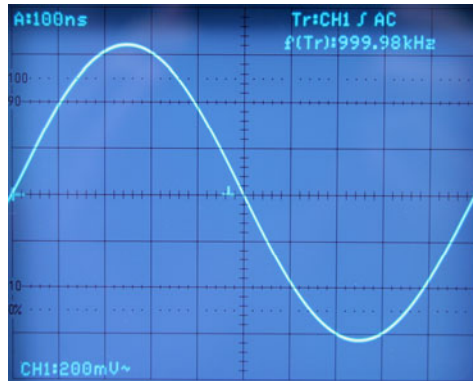


Abb. 1-1 vollständige Schwingung = 1 Ereignis

1.1.4 Mathematischer Zusammenhang

Es gilt folgender Zusammenhang:

$$c = \lambda \cdot f$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist in einem bestimmten Medium konstant. Wird die Frequenz erhöht, muss daher die Wellenlänge kürzer werden. Im Amateurfunk gehen wir meistens von einer konstanten Frequenz aus. Hingegen ändert sich das Medium in dem wir die elektromagnetische Welle transportieren. So schicken wir die elektromagnetische Welle z.B. über ein Koax-Kabel an die Antenne und von dort in die Luft oder ins Vakuum. In einem Koax-Kabel oder in einer Antenne breitet sich die elektromagnetische Welle langsamer aus als im Vakuum.

Aus der Formel $\lambda = \frac{c}{f}$ wird ersichtlich, dass die Wellenlänge bei geringerer Ausbreitungsgeschwindigkeit und gleichbleibender Frequenz abnimmt. Diesen Zusammenhang können wir am Oszilloskop sehr schön zeigen. Als Frequenz nehmen wir 1 MHz und als Ausbreitungsgeschwindigkeit 10 cm/ μ s. Sie werden sich nun fragen, woher ich die 10 cm/ μ s nehme. Das ist die horizontale Ablenkgeschwindigkeit des Kathodenstrahls des Oszilloskopes und entspricht 100'000 m/s .

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{1 \cdot 10^5}{1 \cdot 10^6} = 0.1m$$

Verkürzungsfaktor bei Antennen und Koax-Leitungen

Bei einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von 100'000m/s hat eine 1 MHz Schwingung also eine Wellenlänge von 10 cm. Wäre in einem bestimmten Material die Ausbreitungsgeschwindigkeit nur 100'000 m/s, so hätte eine $\lambda/4$ Antenne bei 1 MHz eine Länge von 2.5 cm.

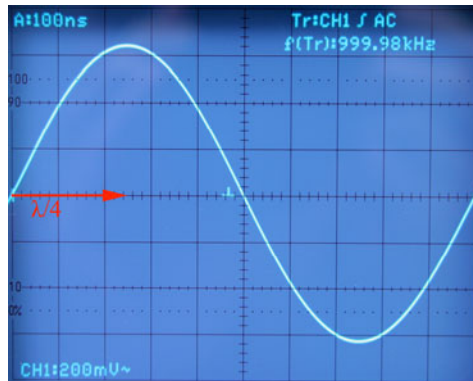


Abb. 1-2 Länge einer $\lambda/4$ Antenne

Verringern wir die Ausbreitungsgeschwindigkeit weiter auf z.B. 80% von 100'000m/s, so haben auf der physikalischen Länge von 10 cm mehr als eine vollständige Schwingung platz und unsere $\lambda/4$ Antenne müsste auf 2 cm schrumpfen.

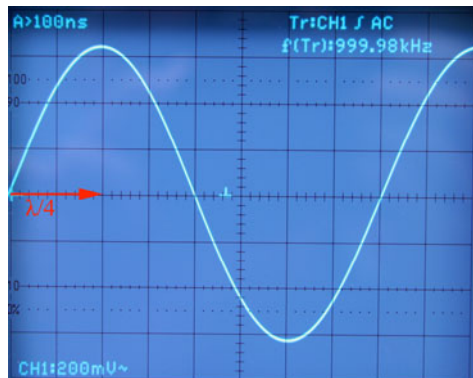


Abb. 1-3 Länge einer $\lambda/4$ Antenne 80% c

Je kleiner also die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist, desto kleiner wird bei gegebener Frequenz die Wellenlänge und desto kürzer muss eine Antenne werden. Aus diesen Ausführungen wird ersichtlich, dass der Verkürzungsfaktor dem Verhältnis von Ausbreitungsgeschwindigkeit in einem bestimmten Medium zur maximalen Ausbreitungsgeschwindigkeit entspricht.

Es folgen nun zwei Experimente zum Verkürzungsfaktor, diesmal aber mit den tatsächlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten elektromagnetischer Wellen. Bei 1 MHz würde die Wellenlänge bei 300 m liegen. Das ist nicht so praktisch für Experimente. Deshalb habe ich die Frequenz so erhöht, dass die Wellenlängen wieder in einen handlichen Bereich kommen.

Verkürzungsfaktor bei Antennen und Koax-Leitungen

2 Verkürzungsfaktor bei Antennen

Antennenstäbe müssen in der Praxis kürzer gemacht werden als dies aus

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ hervorgeht.}$$

Der Grund ist, dass sich die elektromagnetische Welle auf dem Leiter langsamer als im Vakuum ausbreitet.

Untersucht habe ich dies an $\lambda/4$ Monopol-Antennen von 20 und 30 cm Länge und unterschiedlichen Durchmessern.

Nach $f = \frac{c}{\lambda}$ ergibt das eine theoretische Resonanzfrequenz von 374.738 resp. 249.975 MHz.

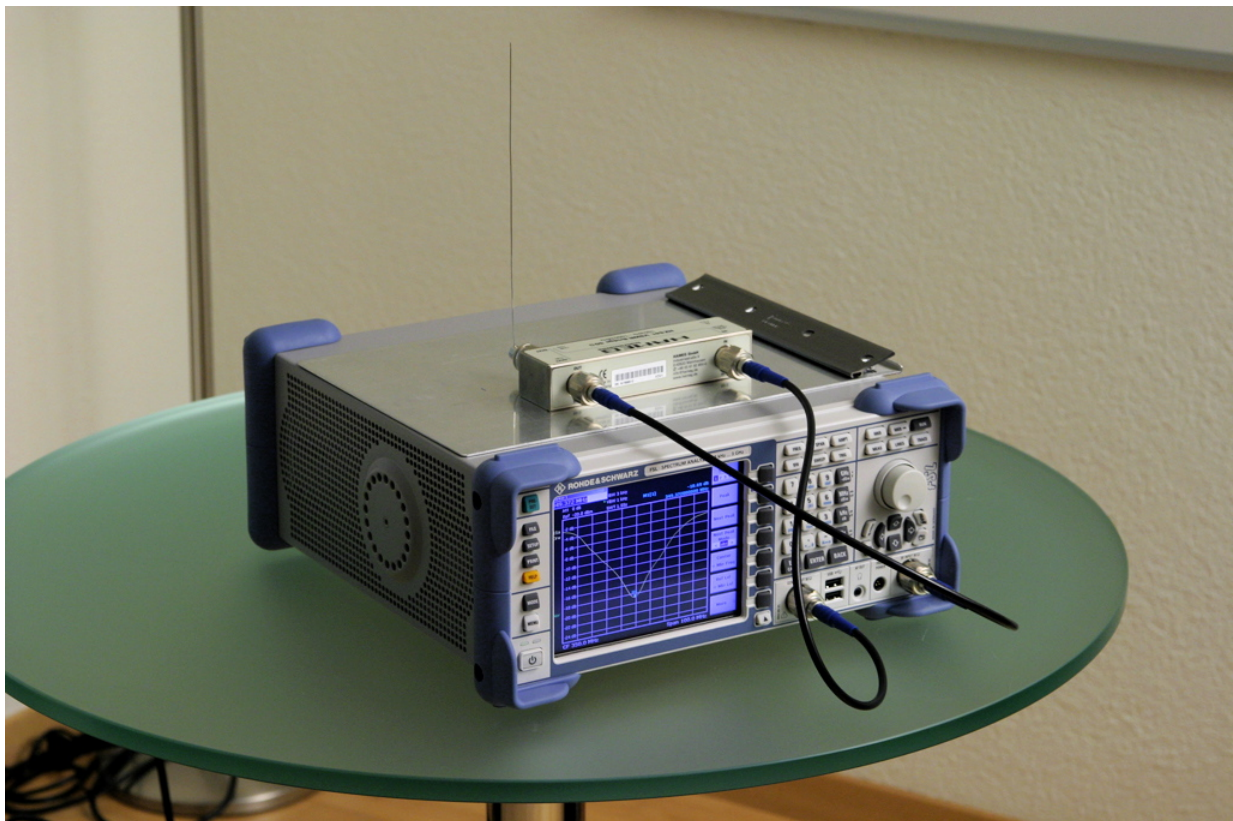


Abb. 2-1 Bestimmung der Resonanzfrequenz

Verkürzungsfaktor bei Antennen und Koax-Leitungen

Wichtig bei den Versuchen ist folgendes:

- Es muss mit möglichst geringen Leistungen gearbeitet werden, um Reflexionen so gering wie möglich zu halten.
- Im Umkreis von ca. 2λ sollten möglichst wenige Objekte sein, die Reflexionen verursachen können.
- Für das Ablesen der Werte sollte man sich aus dem 2λ Bereich fernhalten.
- Die Antenne muss unbedingt auf einer metallischen Unterlage stehen.

Zur Bestimmung des Verkürzungsfaktors V wurde die effektive Resonanzfrequenz bei einer bestimmten Antennenlänge und Antennendicke gemessen.

$$f_0 = \frac{c_0}{\lambda} \quad f_{res} = \frac{c_0 \cdot V}{\lambda} \quad \rightarrow \quad V = \frac{f_{res}}{f_0}$$

l [cm]	d [mm]	f ₀ [MHz]	f _{res} [MHz]	V
20	0.60	374.738	349.372	0.9323
20	0.70	374.738	349.172	0.9318
20	0.98	374.738	348.972	0.9312
30	0.70	249.975	243.600	0.9745

Tabelle 2.1

Aus Tabelle 2.1 ist ersichtlich, dass die Resonanzfrequenz mit zunehmendem Antennendurchmesser etwas abnimmt. Der Grund liegt in der zusätzlichen kapazitiven Belastung der Antenne durch die größere Oberfläche. Auffallend ist, dass eine längere Antenne bei gleichbleibendem Durchmesser mit dem Verkürzungsfaktor schon näher an den Idealwert von 1 herankommt. Das Verhältnis von Länge zu Durchmesser wird Schlankheitsgrad S genannt. Stichworte: *Dachkapazität, Endeffekt, Dickeneffekt*.

Verkürzungsfaktor bei Antennen und Koax-Leitungen

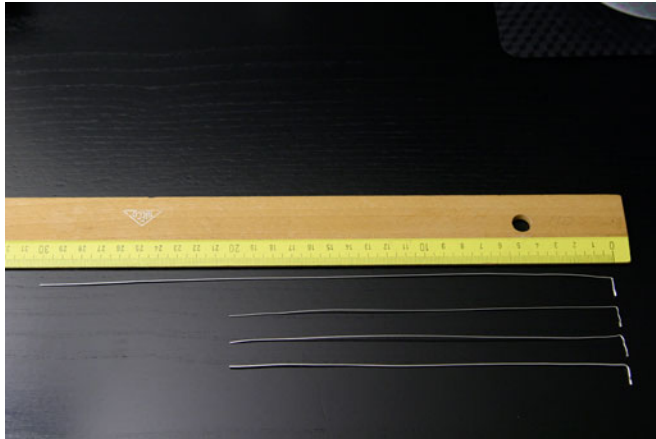


Abb. 2-2 Antennen

Die Antennen wurden aus versilbertem Kupferdraht gefertigt und direkt in die Buchse der Messbrücke gesteckt.

3 Verkürzungsfaktor bei KOAX-Leitungen

Eine elektromagnetische Welle breitet sich in einem Kabel langsamer aus, als im Vakuum. Auch hier wird von einem Verkürzungsfaktor gesprochen. (Obschon das Kabel für die elektromagnetische Welle ja eigentlich länger als die geometrische Länge erscheint...). Der Verkürzungsfaktor muss insbesondere dann beachtet werden, wenn das Koax-Kabel als Bauteil verwendet wird. Beispiele sind *Halbwellen-Umwegleitung*, *Impedanzanpassung mit Viertelwellen-Leitern*, *Stubs*.

Der Verkürzungsfaktor kann in den Herstellerangaben zum Kabel nachgeschlagen werden. Er kann natürlich auch messtechnisch bestimmt werden. Im nachfolgenden Experiment will ich mit einem Oszilloskop, einem Messsender und $\lambda/4$ Koax-Messkabeln die Phasenverschiebung prüfen.

Ich verwende RG58 Kabel mit einem Verkürzungsfaktor von 0.66. Meine Messkabel sind 1.0167m lang. Eigentlich wollte ich sie alle 1 m lang machen. Aber wenn ich mehrere gleichlange Stücke zusammenkopple und die Länge messe komme ich auf 1.0167m pro Kabel. Unsere Wellenlänge wäre also 4.0667m. was einer Frequenz von...

$$f_{res} = \frac{c_0 \cdot V}{\lambda} = \frac{299.79 \cdot 0.66}{4.0667} = 48.654 \text{ MHz}$$

entspricht.

Bei dieser Frequenz verhalten sich meine Messkabel also wie $\lambda/4$ Leitungsstücke.

Die Phasenverschiebungen will ich als Lissajous-Figuren auf dem Oszilloskop darstellen. Wie ich jedoch mit Enttäuschung feststellen muss, reicht die Bandbreite im x/y-Betrieb nur bis 20 MHz. Da es sich aber um periodische Signale handelt, könnte evtl. mit dem Digital-Modus etwas zu machen sein. Tatsächlich funktioniert die Darstellung im Digital-Modus, so dass zumindest die angepeilten Phasenverschiebungen vom 0, 90, und 180 Grad gut ersichtlich sind.

Verkürzungsfaktor bei Antennen und Koax-Leitungen

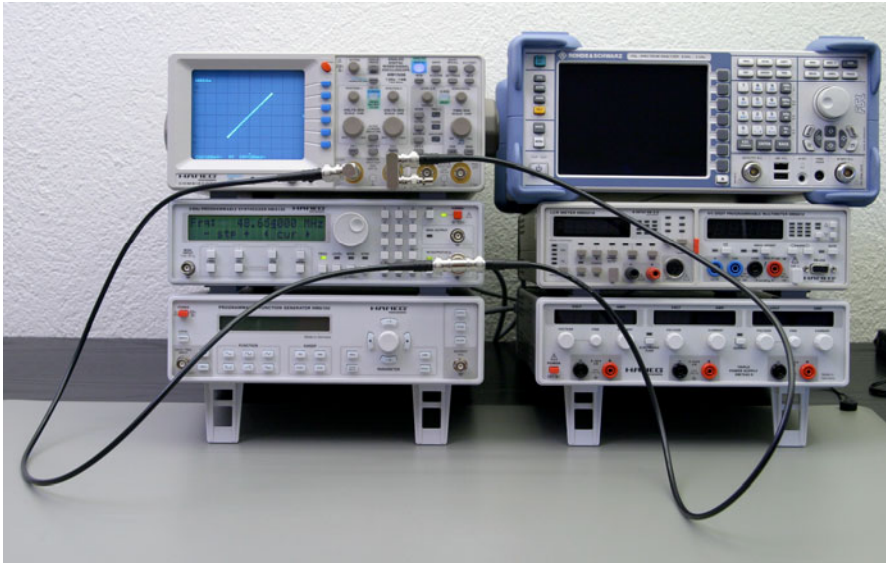


Abb. 3-1 Phasenverschiebung 0 Grad bei gleichlangen Leitungen

Auf **Abb. 3-1** ist der Versuchsaufbau mit den beiden $\lambda/4$ Messkabeln zu sehen. Der Messsender ist auf 48.654 MHz eingestellt. Immerhin ist eine Diagonale ersichtlich, die einer Phasenverschiebung von 0 Grad entspricht. Die Frequenz spielt natürlich bei gleichlangen Leitungen noch keine Rolle.

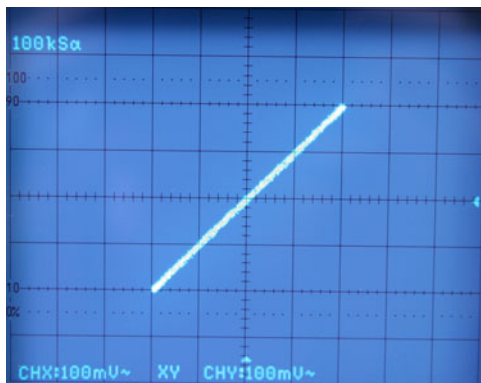


Abb. 3-2 Phasenverschiebung 0 Grad

Verkürzungsfaktor bei Antennen und Koax-Leitungen

Nach Einfügen eines weiteren $\lambda/4$ Leitungsstückes in die Y-Leitung erscheint tatsächlich ein Kreis auf dem Oszilloskop, was einer Phasenverschiebung von 90 Grad entspricht Abb. 3-3.

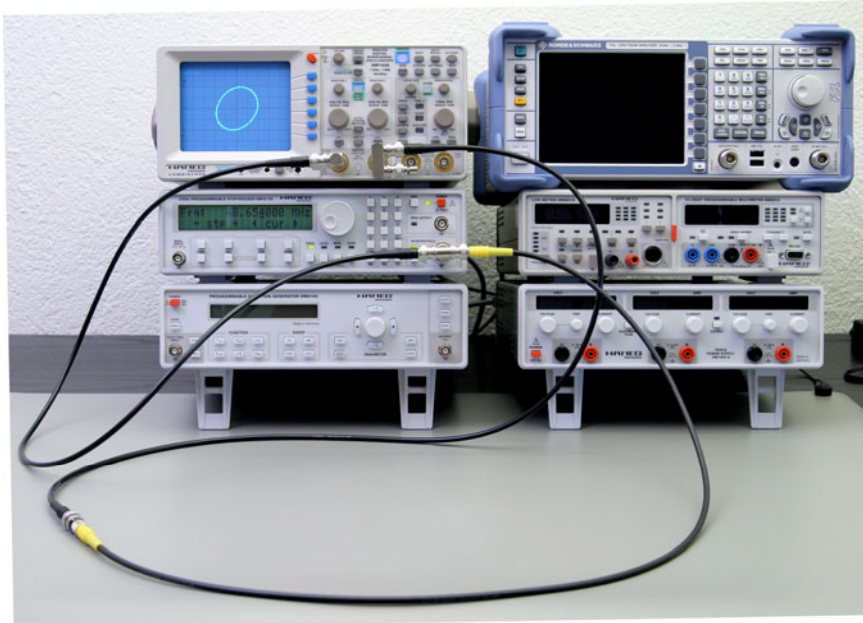


Abb. 3-3 Phasenverschiebung 90 Grad

Nach dem Einfügen eines weiteren $\lambda/4$ Leitungsstückes verschiebt sich die Phase weiter um 90 Grad, so dass jetzt die totale Phasenverschiebung 180 Grad beträgt. Abb. 3-4 zeigt ein Bild dieses Versuchsaufbaus.

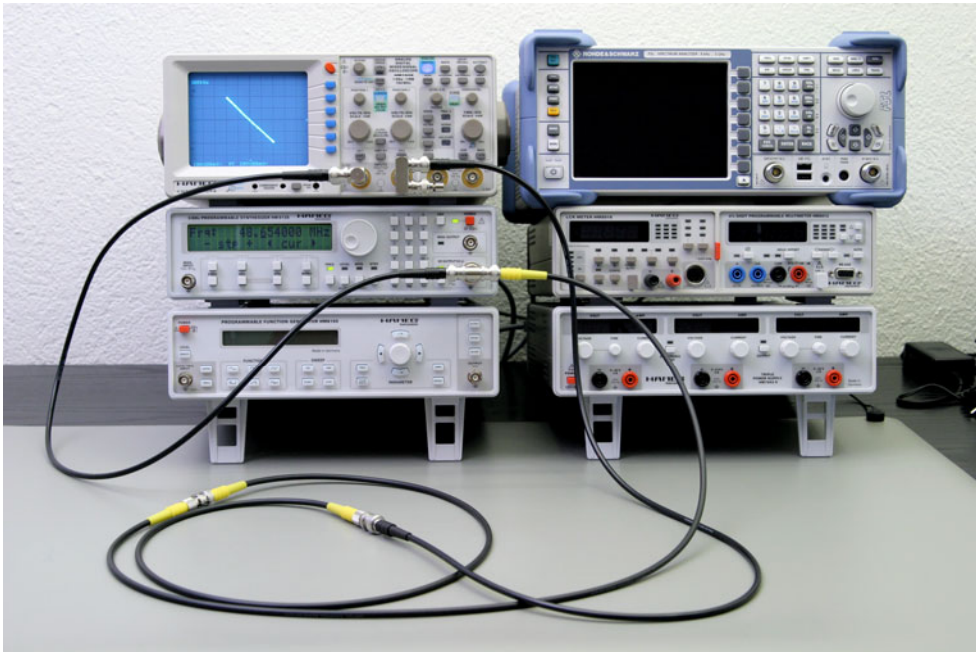


Abb. 3-4 Phasenverschiebung 180 Grad