

Der Hauteffekt

**Der Skin-Effekt,
seine Auswirkungen
auf den Gewinn,
den Verlust und die
Resonanzfrequenz
in KW-Antennen-Systemen**

**Mitteilungen aus dem Institut
für Umwelttechnik
Nonnweiler-Saar
Dr. rer. nat. Schau
DL3LH**

1. Der Hauteffekt

Eine elektromagnetische Welle, die auf die Oberfläche eines Leiters trifft, wird in diesem Leiter nach einer e-Funktion gedämpft. Die Amplitude nimmt in Richtung zum Inneren des Leiters exponentiell ab. Für die Abnahme ist der Faktor d im Argument der e-Funktion kennzeichnend. Er liefert uns die Entfernung, in der die Feldstärke auf den $1/e$ ten Teil, also auf 36.9 % der Ausgangsgröße an der Oberfläche abnimmt. Diese Entfernung wird als die Eindringtiefe, besser äquivalente Leitschichtdicke, bezeichnet.

Ihre Größe berechnet sich aus den Maxwell'schen-Gleichungen und dem Induktionsgesetz zu

$$d * \sqrt{\pi f \mu \kappa} = 1 \quad (\text{Gl 1})$$

Da die absolute Permeabilität $\mu = \mu_0 \mu_r$ für die meisten elektrischen leitenden Stoffe mit Ausnahme von Eisen gleich groß und konstant ist, ist die Eindringtiefe in den meisten Fällen nur von der Leitfähigkeit κ und der Frequenz f abhängig.

Bei Stoffen mit geringer Leitfähigkeit ist die Eindringtiefe d sehr groß. Für κ gegen Null (reiner Isolierstoff) geht die Eindringtiefe gegen unendlich. Das bedeutet, dass die Welle fast ungehindert durch den Isolierstoff hindurch geht. Die Größe der Frequenz spielt hierbei eine untergeordnete Rolle. Je größer aber die elektrische Leitfähigkeit des Materials wird, umso kleiner ist die Eindringtiefe. Am kleinsten ist sie daher bei gut leitenden Materialien wie Kupfer, Silber, Gold usw. Dabei macht sich die Frequenz stark bemerkbar. Je höher die Frequenz wird, umso geringer dringt die elektromagnetische Welle in den Körper ein. Der elektrische Strom fließt quasi nur noch auf der äußeren Haut des Materials. Man nennt daher diese bei höheren Frequenzen auftretende Erscheinung den Haut- oder Skineffekt. Da meist Draht für die hochfrequente Leitungsführung verwendet wird, fließt nur noch im äußeren Teil des Drahtes ein hochfrequenter Strom. Dadurch wird der elektrische Widerstand des Leiters gegenüber dem Gleichstromwiderstand erhöht. Das Drahtinnere ist dabei mehr oder weniger strom- und feldfrei. Es sei noch erwähnt, dass sich die Phase der Feldstärke in Richtung auf das Leitungsnere und damit die Phase der Stromdichte ändert. Bei der Eindringtiefe d ist der induktive Widerstand gleich groß dem ohmschen. Die Phasenverschiebung beträgt $\pi/4$ oder 90 Grad.

Berechnet man den Gesamtstrom durch Integration über den Leiterdurchmesser, so kann der Energieverlust des von der Eindringtiefe beanspruchten Querschnittes und Widerstandes ermittelt werden. Vom Standpunkt der Verluste kann man sich den Gesamtstrom über den Querschnitt als gleichmäßig verteilt fließend denken, der der Eindringtiefe entspricht. Der ohmsche Widerstand ist dabei gleich dem ohmschen Widerstand eines Prismas mit der Dicke der Eindringtiefe d . Das tatsächliche Wellenfeld dringt aber etwa 4 bis 8 d ein, also weit mehr als die definierte Eindringtiefe oder äquivalente Leitschichtdicke.

2. Leitfähigkeitswerte einiger bekannter Stoffe

Damit man nicht lange suchen muss, sei die Leitfähigkeit einiger bekannter Stoffe angegeben.

Leiterwerkstoff	Leitfähigkeit κ Sm / mm ²	Bemerkungen
Silber	62.5	abhängig von Temperatur
Kupfer	57.5	und Druck
Gold	44.0	
Aluminium	35.2	
Eisen	10 bis 7	
Blei	4.8	
Konstantan	2.0	
Bronze	55 - 18	je nach mechanischer Festigkeit

Tab. 1: Elektrische Leitfähigkeit einiger bekannter Materialien

Um die Größenordnung beurteilen zu können und ein Gefühl für die Eindringtiefe zu bekommen, berechnen wir den numerischen Wert für Kupfer. Dabei ergibt sich die zugeschnittene Größengleichung mit d in mm, wenn f in Hz (1/s) eingesetzt wird zu

$$d \text{ (mm)} = 66.2 / \sqrt{f(1/s)}. \quad (\text{Gl 2})$$

Frequenz MHz	Eindringtiefe mm	Bemerkungen
5 x E-5	9.360	50 Hz Wechselstrom
0.0010	6.620	1000 Hz Wechselstrom
0.5000	0.093	Anfang Mittelwellenband
1.0000	0.062	Mittelwelle
3.5000	0.035	80 m Band
7.0500	0.024	40 m Band
10.200	0.021	30 m Band
15.000	0.017	20 m Band
20.000	0.015	15 m Band
25.000	0.013	12 m Band
30.000	0.012	10 m Band

Tab. 2: Äquivalente Leitschichtdicke für Kupfer bei verschiedenen Frequenzen

Aus Tab. 2 ist ersichtlich, dass für Industrie-Wechselströme die Eindringtiefe in der Größenordnung von Zentimeter, für hohe Frequenzen dagegen im Bereich von Zehntel- oder Hunderstel-Millimeter liegt. Selbst bei Industrie-Wechselströmen lohnt es sich vom runden auf den rechteckigen Querschnitt (Sammelschienen) umzusteigen, weil dieser bei einem bestimmten Verhältnis von Breite zu Länge rund 10 % weniger Verluste hat. Den Wert für d kann für andere Materialien mittels der Werte aus der Tab. 1 der (Gl 1) umgerechnet werden.

Zur besseren Übersicht sei die Eindringtiefe in einen Kupferleiter bildlich - nicht maßstäblich - dargestellt.

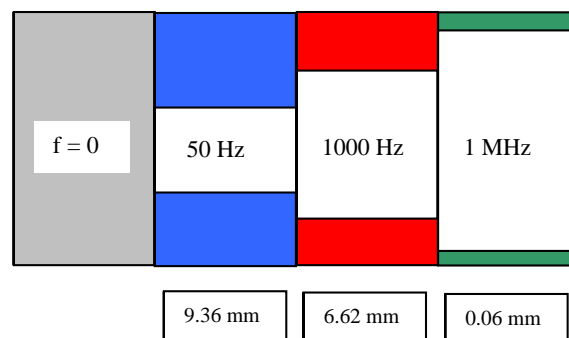


Bild 1: Eindringtiefe in einen Kupferleiter bei verschiedenen Frequenzen

3. Widerstandserhöhung durch den Skin-Effekt

Der Skin-Effekt erhöht den Wirkwiderstand. Dazu berechnen wir einmal die Wirkwiderstandserhöhung eines 50 m langen, freien Kupferdrahtes mit dem Durchmesser $D = 1.5$ mm bei den Frequenzen: 0 Hz, 10 KHz, 100 KHz, 1 MHz, 10 MHz, 100 MHz und 1 GHz.

Frequenz	Eindringtiefe d / mm	Wirksame Kreisringfläche mm^2	Widerstandswert Kupfer Ω	Bemerkungen
0 Hz	-	1.7671	0.49207	Gleichstrom
10 KHz	0.66200	1.7428	0.49894	
100 KHz	0.20934	0.8488	1.02460	
1 MHz	0.06620	0.2981	2.91612	
10 MHz	0.02093	0.09727	8.93936	
100 MHz	0.00662	0.03105	27.9978	
1.0 GHz	0.00209	0.009851	88.2695	

Tab. 3: Widerstandserhöhung eines gestreckten Kupferdrahtes mit 1.5 mm Durchmesser und 50 m Länge durch den Skin-Effekt

Die Kreisringfläche berechnet sich aus dem einfachen Zusammenhang

$$A = \pi d (D - d) \quad (\text{Gl 3})$$

mit D als Durchmesser des Drahtes.

Der induktive Blindwiderstand hat bei der Eindringtiefe d die gleiche Größe wie der Wirkwiderstand. Die Phasenverschiebung ist $\varphi = 90$ grad. Man erkennt aus Tab. 3 auch, dass der Wirkwiderstand erst bei höheren Frequenzen eine nennenswerte Zunahme erfährt.

Als Vergleich so noch der Widerstandswert für das Material Eisen genannt. Er ist $R = 7.75 \Omega$ bei der Frequenz $f = 1$ MHz und damit mehr als doppelt so hoch wie bei Kupfer.

4. Skin-Effekt und Verluste in hochfrequenten Leitungen

Leitungen für den Leistungstransport bestehen in der Regel aus einer Hin- und Rückleitung. In beiden entsteht eine Widerstandserhöhung durch den Skin-Effekt. Verluste werden aber nicht nur durch die wirksamen Wirkwiderstände, sondern auch durch das nicht ideale Dielektrikum verursacht. Was die Sache ein wenig unübersichtlich macht ist die Tatsache, dass wir es hier mit verteilten Widerständen, Induktivitäten und Ableitungen zu tun haben. Der totale Verlust setzt sich immer aus diesen Komponenten zusammen und ist für jede Leitung charakteristisch. Durch die Kapazitäten der realen Leitung ist auch der Wellenwiderstand nicht mehr reell, sondern komplex mit einer kapazitiven Komponente

$$Z_0 = R_0 - j X_0. \quad (\text{Gl 4})$$

Jede Leitung hat also ihre charakteristischen Werte, die den Tabellen der Hersteller entnommen werden können um sie in der Berechnung zu berücksichtigen. Nur überschlägig kann mit einem reellen Wellenwiderstand gerechnet werden.

Tab. 4 zeigt die Verluste in dB einiger bekannter Leitungen bei Abschluss der Leitung mit einem reellen Widerstand, der identisch dem Realteil des charakteristischen Wellenwiderstandes R_0 der verlustlosen Leitung ist. Der Verlust gilt jeweils für eine Länge von 100 m und kann für kürzere oder größere Längen linear umgerechnet werden. Zusätzlich entstehen Verluste bei Fehlabschluss der Leitung.

Leitungsbezeichnung	RG 58 A	RG 213	RG 218	Feeder 450 Ω	Feeder 600 Ω
3.5 MHz	2.496	1.151	0.458	0.149	0.104
7.050 MHz	3.747	1.733	0.694	0.221	0.153
14.200 MHz	5.617	2.607	1.049	0.328	0.227
21.200 MHz	7.081	3.294	1.330	0.411	0.284
29.000 MHz	8.487	3.955	1.600	0.490	0.339

Tab. 4: Verluste in dB einer mit dem Wellenwiderstand abgeschlossenen Leitung

Verluste von nur 1 dB entsprechen einem Verlust von 20.5 %, 3 dB entsprechend 50 % Verlust usw.

Welche Auswirkungen hat nun der Skin-Effekt auf die Abstrahlung und den Antennengewinn?

Die Formulierung: „Die Antenne ist der beste Hochfrequenzverstärker“ hat hier ihre besondere Bedeutung. Um die Auswirkungen unterschiedlicher Materialien auf den Antennengewinn zu sehen, berechnen wir einmal einen resonanten Dipol in 10 m Höhe über realem Grund und für das 80 m Band.

Material	Resonanzwiderstand Ω	VSWR bez. auf 50 Ω	Antennengewinn dBi	Resonanzfrequenz MHz
verlustlos	29	1.72	8.72	3.695
Kupfer	31	1.61	8.39	3.605
Aluminium	31	1.61	8.31	3.605
Eisen	91	1.82	3.71	3.616

Tab. 5: Kenngrößen eines 80 m Dipols bei verschiedenen Materialien

Der Verlust an Antennengewinn bei einer Antenne aus dem Material Eisen ist gegenüber einer Antenne aus dem Material Kupfer 4.68 dB oder 66 % - also etwa eine S-Stufe (6 dB).

Eine genaue Rechnung zeigt den exakten Verlust von $L = 53$ % - genug um Eisen oder ähnliche Werkstoffe aus dem Antennenbau zu verbannen. Geht man von der gleichen Grenzempfindlichkeit eines Empfängers und einem Schwellwert von 0 dB am Empfangsort aus, dann verringert sich die Reichweite bei gleichen Bedingungen etwa um den Faktor 2 - aus 6000 km werden 3000 km - oder man wird auch „angenehm“ leise.

Vy 73, Walter, DL3LH

wa-schau@t-online.de
www.heide-holst.de

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.