

# **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. 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

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

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  $\kappa$  und der Frequenz  $f$  abhängig.

Bei Stoffen mit geringer Leitfähigkeit ist die Eindringtiefe  $d$  sehr groß. Für  $\kappa$  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 $\kappa$<br>Sm/mm <sup>2</sup> | Bemerkungen                          |
|-----------------|--|--------------------------------------|
| Silber          | 62.5   | abhängig von Temperatur<br>und Druck |
| Kupfer          | 57.5   |                                      |
| Gold            | 44.0   |                                      |
| Aluminium       | 35.2   |                                      |
| Eisen           | 10 bis 7                                     |                                      |
| Blei            | 4.8  |                                      |
| Konstantan      | 2.0  |                                      |
| Bronze          | 55 - 18                                      | je nach mechanischer Festigkeit      |

**Tab. 2.1:** 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

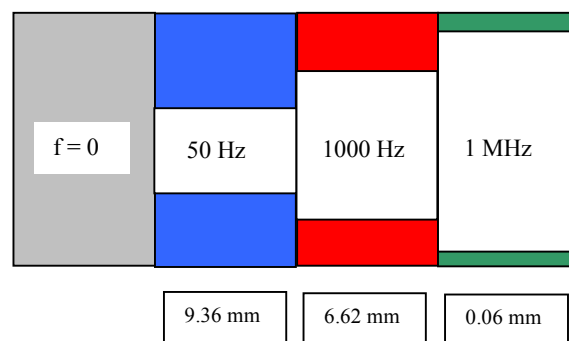
$$d \text{ (mm)} = 66.2 / \sqrt{f \text{ (1/s)}}. \quad (\text{Gl.2})$$

| Frequenz<br>MHz | Eindringtiefe<br>mm | Bemerkungen             |
|-----------------|---------------------|-------------------------|
| 5 x E -5        | 9.386               | 50 Hz Wechselstrom      |
| 0.0010          | 2.098               | 1000 Hz Wechselstrom    |
| 0.5000          | 0.093               | Anfang Mittelwellenband |
| 1.0000          | 0.062               | Mittelwelle             |
| 3.5000          | 0.035               | 80 m Band               |
| 7.0500          | 0.025               | 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. 2.2** Äquivalente Leitschichtdicke für Kupfer bei verschiedenen Frequenzen

Aus Tab. 2.2 ist ersichtlich, dass für Industrie-Wechselströme die Eindringtiefe in der Größenordnung von Zentimeter, für hohe Frequenzen dagegen im Bereich von Zehntel- oder Hundertstel-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. 2.1 der (Gl.1) umgerechnet werden.

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



**Bild 2.1:** Eindringtiefe in einen Kupferleiter bei verschiedenen Frequenzen

### 3. Widerstandserhöhung durch den Skin-Effekt

Der Skin-Effekt erhöht den Wirkwiderstand. Dazu berechnen wir 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<br>d<br>mm | wirksame<br>Kreisringfläche<br>mm <sup>2</sup> | Widerstandswert<br>Kupfer<br>$\Omega$ | Faktor  | Bemerkungen |
|----------|--------------------------|--|---------------------------------------|---------|-------------|
| 0 Hz     |                          | 1,76714  | 0,4920                                |         | Gleichstrom |
| 10 KHz   | 0,66372                  | 1,74376  | 0,4987                                | 1,014   |             |
| 100 KHz  | 0,20989                  | 0,85068  | 1,0222                                | 2,078   |             |
| 1 MHz    | 0,06637                  | 0,29893  | 2,9089                                | 5,912   |             |
| 10 MHz   | 0,02099                  | 0,09752  | 8,9165                                | 18,123  |             |
| 100 MHz  | 0,00664                  | 0,03114  | 27,9255                               | 56,759  |             |
| 1 GHz    | 0,00210                  | 0,00988  | 88,0406                               | 178,944 |             |

**Tab. 3.1** 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

$$A = \pi d (D - d) \quad (\text{Gl.3.1})$$

mit  $D$  als Durchmesser des Drahtes und  $d$  als Eindringtiefe.

Der induktive Blindwiderstand hat bei der Eindringtiefe  $d$  die gleiche Größe wie der Wirkwiderstand. Die Phasenverschiebung ist  $\varphi = 90$  Grad. Man erkennt aus Tab. 3.1 auch, dass der Wirkwiderstand erst bei höheren Frequenzen eine nennenswerte Zunahme erfährt.

| Frequenz | Eindringtiefe<br>d<br>mm | wirksame<br>Kreisringfläche<br>mm <sup>2</sup> | Widerstandswert<br>Kupfer<br>$\Omega$ | Bemerkungen |
|----------|--------------------------|--|---------------------------------------|-------------|
| 0 Hz     |                          | 3,14159  | 0,2768                                | Gleichstrom |
| 10 KHz   | 0,66372                  | 2,78633  | 0,3121                                |             |
| 100 KHz  | 0,20989                  | 1,18037  | 0,7367                                |             |
| 1 MHz    | 0,06637                  | 0,40319  | 2,1567                                |             |
| 10 MHz   | 0,02099                  | 0,13049  | 6,6637                                |             |
| 100 MHz  | 0,00664                  | 0,04156  | 20,9209                               |             |
| 1 GHz    | 0,00210                  | 0,01317  | 66,0073                               |             |

**Tab. 3.2** Widerstandserhöhung eines gestreckten Kupferdrahtes mit 2 mm Durchmesser und 50 m Länge durch den Skin-Effekt, wie bei einer Antenne

Als Vergleich sei noch der Widerstandswert für das Material Eisen als Funktion der Frequenz genannt.  
Bei einem  $\mu_r$  für Eisen etwa 200 – 400

| Frequenz | Eindringtiefe<br>d<br>mm | wirksame<br>Kreisringfläche<br>mm <sup>2</sup> | Widerstandswert<br>Eisen<br>$\Omega$ | Bemerkungen |
|----------|--------------------------|--|--------------------------------------|-------------|
| 0 Hz     |                          | 1,76714  | 2,8294                               | Gleichstrom |
| 10 KHz   | 0,1125                   | 0,49054  | 10,1928                              |             |
| 100 KHz  | 0,0356                   | 0,16373  | 30,5388                              |             |
| 1 MHz    | 0,0113                   | 0,05264  | 94,9936                              |             |
| 10 MHz   | 0,0036                   | 0,01673  | 298,8514                             |             |
| 100 MHz  | 0,0011                   | 0,00530  | 943,5169                             |             |
| 1 GHz    | 0,0004                   | 0,00168  | 2982,1315                            |             |

**Tab. 3.3** Widerstandserhöhung eines gestreckten Eisendrahtes mit 1.5 mm Durchmesser und 50 m Länge durch den Skin-Effekt,  $\mu_r = 200$ ,  $\kappa = 10$

| Frequenz | Eindringtiefe<br>d<br>mm | wirksame<br>Kreisringfläche<br>mm <sup>2</sup> | Widerstandswert<br>Eisen<br>$\Omega$ | Bemerkungen |
|----------|--------------------------|--|--------------------------------------|-------------|
| 0 Hz     |                          | 3,14159  | 1,5915                               | Gleichstrom |
| 10 KHz   | 0,11254                  | 0,66732  | 7,4927                               |             |
| 100 KHz  | 0,03559                  | 0,21963  | 22,7658                              |             |
| 1 MHz    | 0,01125                  | 0,07031  | 71,1108                              |             |
| 10 MHz   | 0,00356                  | 0,02232  | 224,0054                             |             |
| 100 MHz  | 0,00113                  | 0,00707  | 707,5049                             |             |
| 1 GHz    | 0,00036                  | 0,00224  | 2236,4659                            |             |

**Tab. 3.4** Widerstandserhöhung eines gestreckten Eisendrahtes mit 2 mm Durchmesser und 50 m Länge durch den Skin-Effekt,  $\mu_r = 200$ ,  $\kappa = 10$

#### 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

$$\underline{Z}_0 = R_0 - j X_0. \quad (\text{Gl.4.1})$$

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 Wellen - widerstand gerechnet werden.

Tab. 4.1 zeigt die Verluste in dB einiger bekannter Leitungen bei Abschluss der Leitung mit einem reellen Widerstand, der identisch ist dem Realteil des charakteristischen Wellenwiderstandes  $R_0$  der verlustlosen Leitung. 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<br>450 $\Omega$ | Feeder<br>600 $\Omega$ |
|---------------------|---------|--------|--------|------------------------|------------------------|
| 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. 4.1** Verluste in dB einer mit dem Wellenwiderstand abgeschlossenen Leitung der Länge  $l = 100$  m

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   | Resonanz-<br>widerstand<br>$\Omega$ | VSWR<br>bez. auf 50 $\Omega$ | Antennengewinn<br>dBi | Resonanzfrequenz<br>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. 4.2** 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  $\text{Loss} = 53$  % - 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.

DL3LH, Walter

[wa-schau@t-online.de](mailto:wa-schau@t-online.de)  
[www.heide-holst.de](http://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.  
This page will not be added after purchasing Win2PDF.