

attempo

Magnetische Bauteile und Baugruppen

Grundlagen, Anwendungsbereiche, Hintergründe und Historie

Attempo

induktive Bauteile,
Feldbustechnik
Testhaus

Steinbruchstr. 15
72108 Rottenburg

Tel.: +49 (0) 7472 9623 90
Fax: +49 (0) 7472 9623 92

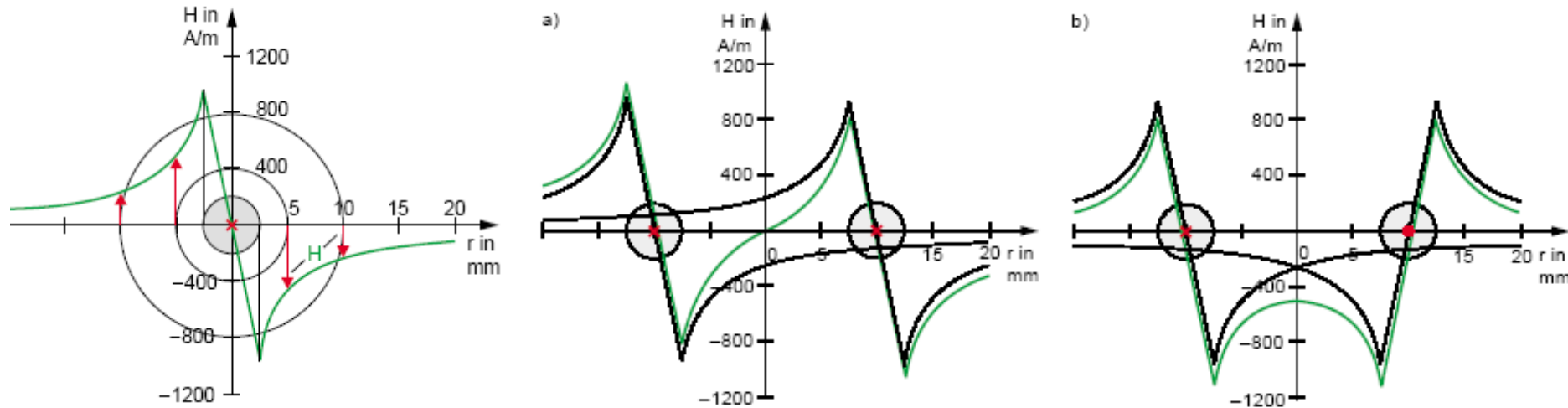
eMail: info@attempo.com
www.attempo.com



- Induktive Bauteile
Berechnung, Simulation
und Test
- Kleinserienfertigung
- Filtersysteme
- EMV –Test, Beratung
und Seminare
- Entwicklungsunter-
stützung
- Kommunikationstechnik
- Feldbusanalysen
und Komponententest
- Umweltprüfverfahren
- Information

Version 1.1 25.06.2009

Der Skineneffekt und Proximityeffekt - magnetische Feldverteilung



Feldverteilung in Leitungen

1) Einzelleitung
Beispiel mit 15 A

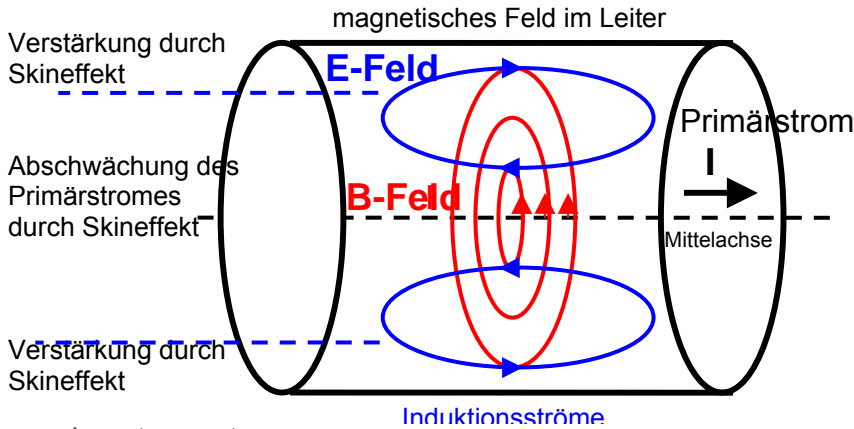
a) die Stromrichtung in den Leitern unterschiedlich

b) die Stromrichtung in beiden Leitern ist gleich

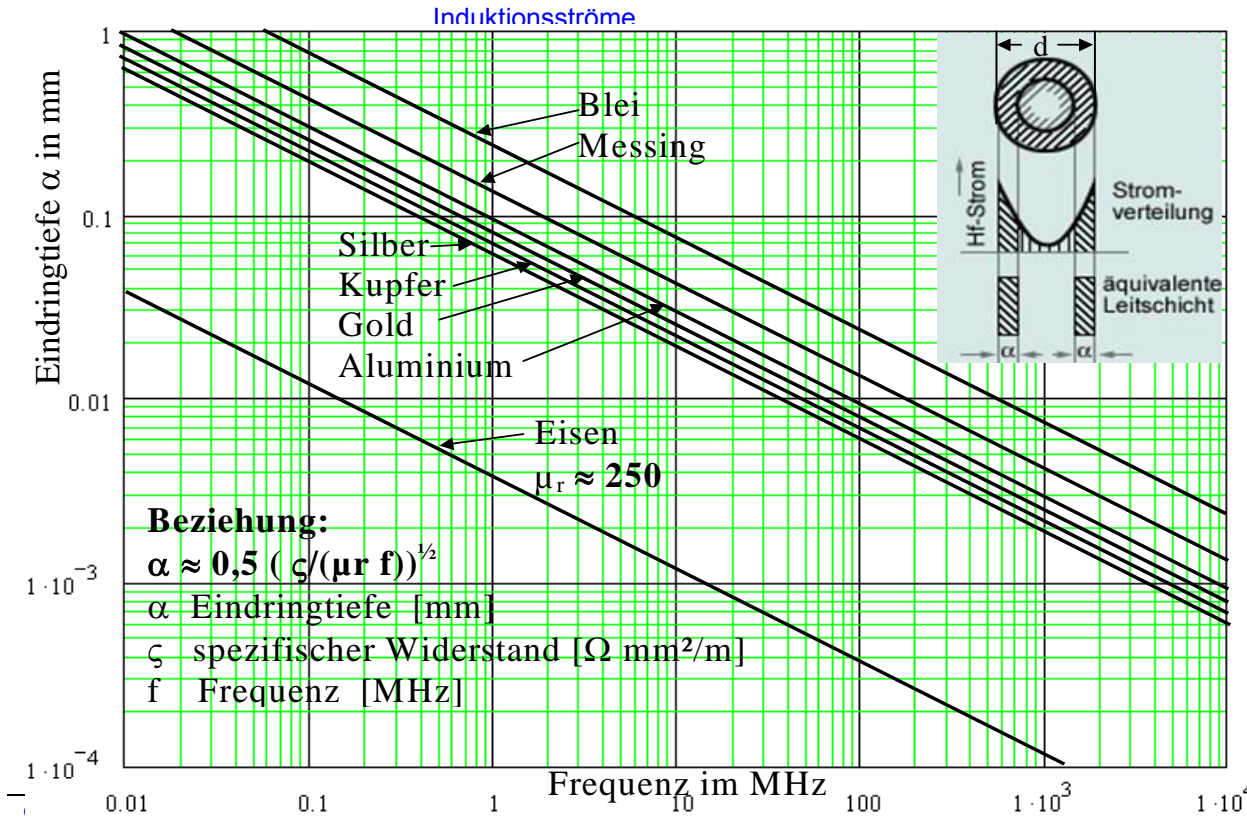
Auswirkungen z.B. Crosstalk zusammen mit kapazitiver Kopplung

Um den Strom durch einen Leiter zu transportieren, ist Energie erforderlich, da die bewegten Ladungen mit den Atomen des Metallgitters zusammenstoßen, ihre kinetische Energie auf diese übertragen, erneut Bewegungsenergie aus dem elektrischen Feld aufnehmen und nach kurzer Wegstrecke wieder mit den Atomen zusammenstoßen usw. Die Energieaufnahme der Metallatome äußert sich in größeren Schwingungen um deren Ruhelage. Aus der Energie der Ladungen entsteht so Wärmeenergie bzw. Wärmeleistung im Leiter. Diese in Wärme umgewandelte elektrische Leistung wird als Stromwärmeverlust bezeichnet. Wird der Leiter dagegen mit Wechselstrom belastet, ist die in ihm erzeugte Verlustleistung um einen Stromverdrängungsfaktor k größer. Diese Verstärkung wird mit dem Skin- und Proximityeffekt erklärt und muss wie beim elektrischen Kreis (Drähte) auch beim magnetischen Kreis (Kerne) beachtet werden.

Skineffekt- frequenzabhängige Feldverteilung im Stromleiter und im Ferrit



Der „**Skineffekt**“ Hauteffekt ist also die Auswirkung von Wirbelströmen auf den ohmschen und den induktiven Widerstand. Während in einem Gleichstrom durchflossenen, geradlinigen Leiter die Stromdichte an allen Stellen des Leiters den gleiche Wert hat, ist es bei Wechselstrom nicht mehr der Fall. Es findet eine Verdrängung des Stromes nach Außen statt. Bei sehr hochfrequenten Wechselströmen ist der Strom auf eine dünne Haut an der Oberfläche beschränkt. Das innere des Leiters ist stromlos. Es kommt auch zur Laufzeit- und Signalverzerrung im Leiter.



Reduzierung des Leitungsquerschnitts durch den frequenzabhängigen Skineffekt. Zum Vergleich der Ohm'sche Widerstand und die Suszeptibilität (Permeabilität)

Material	ζ $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$	χ $\mu_r = \chi - 1$
Silber	0,01612	$-2,5 \cdot 10^{-7}$
Kupfer	0,01724	$-7,4 \cdot 10^{-6}$
Gold	0,02222	$-3,4 \cdot 10^{-7}$
Chrom	0,026	$1,8 \cdot 10^{-4}$
Aluminium	0,03030	$2,1 \cdot 10^{-5}$
Zink	0,048	$-1,2 \cdot 10^{-5}$
Nickel	0,061	
Messing	0,07692	
Zinn	0,10	$2,4 \cdot 10^{-6}$
Platin	0,111	$2,6 \cdot 10^{-4}$
Stahl	0,1	250

Magnetische Bauteile von G.Schindler

Die Diskrepanz von unterschiedlichen Auswertungen, Publikationen und Ergebnissen zum Skineffekt liegt in der Annäherung einer komplexen Besselschen Funktion durch einfacher Algebra. Die Unterschiede sind in der unteren Grafik aufgezeichnet. Beispiel: Verhältnis der Widerstandsänderung nach Philippow für niedere und höhere Frequenzen.

r = Radius in mm hier 0,25mm²
 l = Drahtlänge in m hier 1 m
 f = Frequenz in Hz hier 1 kHz ... 10 MHz
 μ₀ = magnetische Feldkonstante = 1,257 * 10⁻⁶ [Vs/Am]

χ = Leitwert 1/Ω $\chi := \frac{1}{0.01724} \cdot 10^6$ [Ωm]

R_{Cu} = Spez. Widerstand ζ Cu 0,01724 [Ωmm²/m]

$$R_{NF} := \frac{r \cdot 10^{-3} \cdot 1}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot x \cdot 10^3 \cdot 1.257 \cdot 10^{-6} \cdot \mu_r \cdot \chi}$$

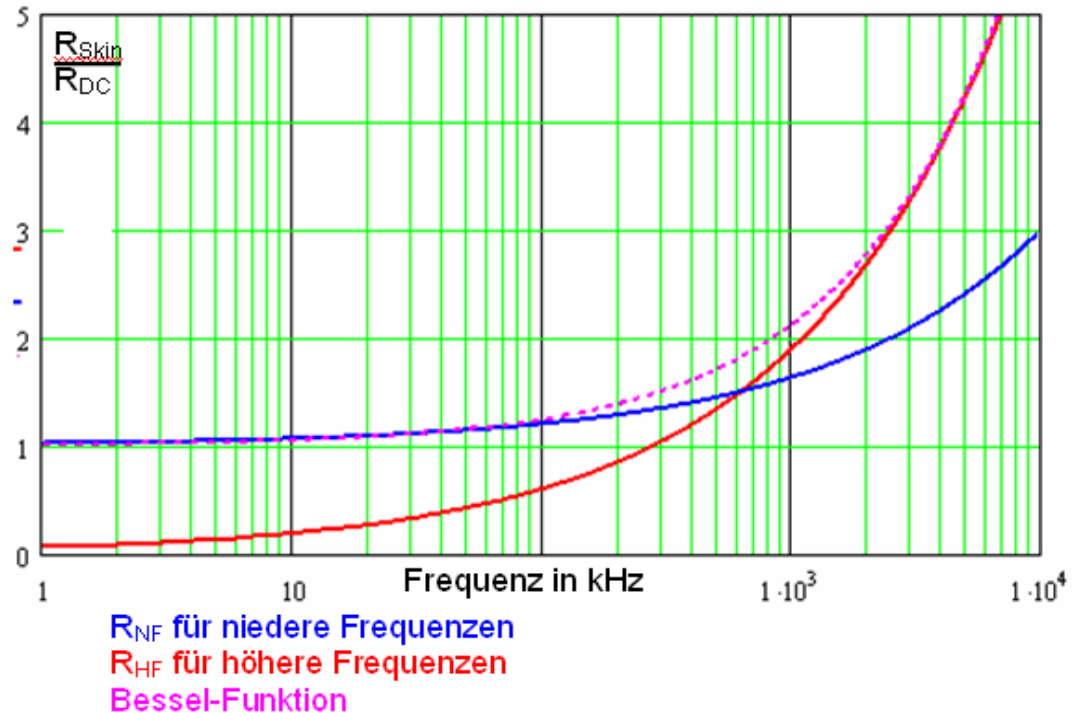
R_{NF} für niedere Frequenzen

$$R_{HF} := 1 + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{r \cdot 10^{-3} \cdot 1}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot y \cdot 10^3 \cdot 1.257 \cdot 10^{-6} \cdot \mu_r \cdot \chi} \right)$$

R_H für höhere Frequenzen

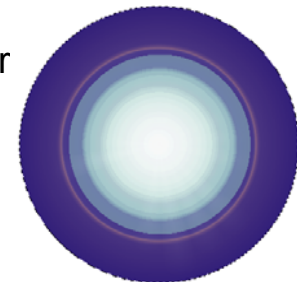
Der Begriff Skinfaktor ist das Verhältnis:

$$Skin_factor = \frac{R_{skin}}{R_{dc}}$$



Verhältnis der Widerstandsänderung durch den Skineffekt bei einer Drahtstärke von 0,5 mm

Stromverdrängung zur Leiteroberfläche



Feldverteilung zwischen den Stromleitern durch den Proximity-Effekt

Wenn mehrere Leiter nebeneinander liegen, wird die Stromdichteverteilung eines Leiters durch das magnetische Feld der nebenbei liegenden Leiter beeinflusst. Dieses Phänomen wird als "Proximity Effekt" bezeichnet.

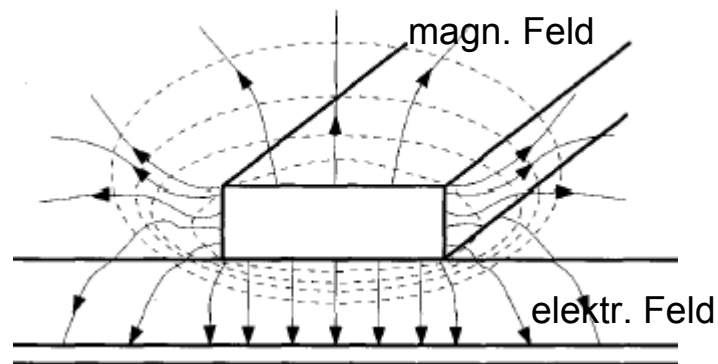
Auch der Proximity-Effekt kommt im magnetischen Kreis vor, wird auch zumeist in den Datenblättern der Kernhersteller durch die Kernverluste berücksichtigt.

In Schaltnetzteilen ist der Proximity-effekt stark ausgeprägt: **Laden** ⇔ **entladen** bei relativ hohen Frequenzen.

Egal ob Fly-Back oder Durchfluss-Wandler! Die Verluste, die durch den Proximity-Effekt verursacht werden sind je nach Feldstärke (Strom) um ein vielfaches höher als die Verluste durch den Skin-Effect.

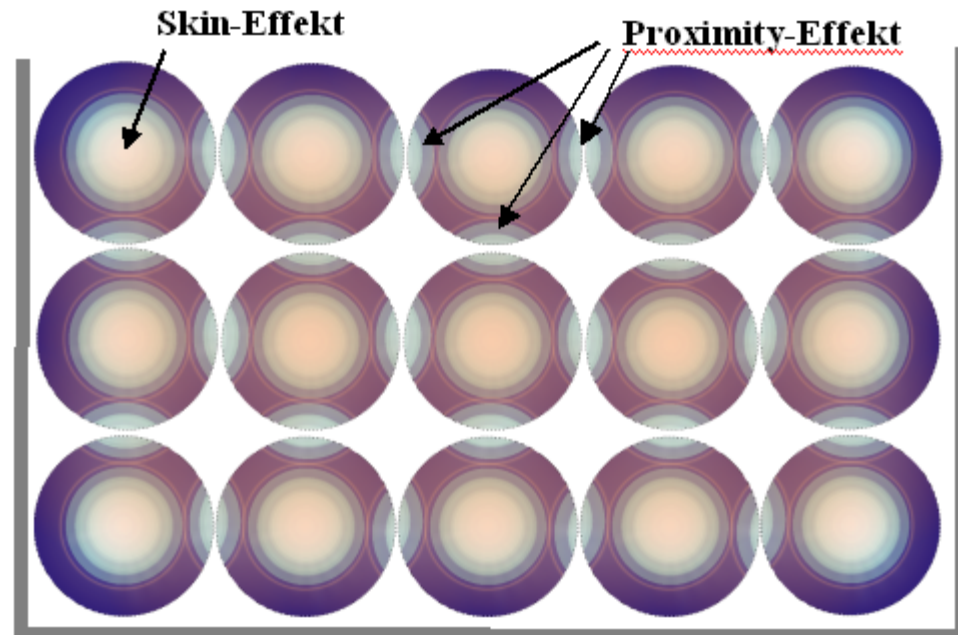
Der Proximity-Effect ist abhängig von:

- Frequenz
- Strom
- Leitergeometrie (Form und Größe)
- Position der Leiter zueinander
- Abstand



das elektrische und magnetische Feld

Beispiel mit Rundleitern



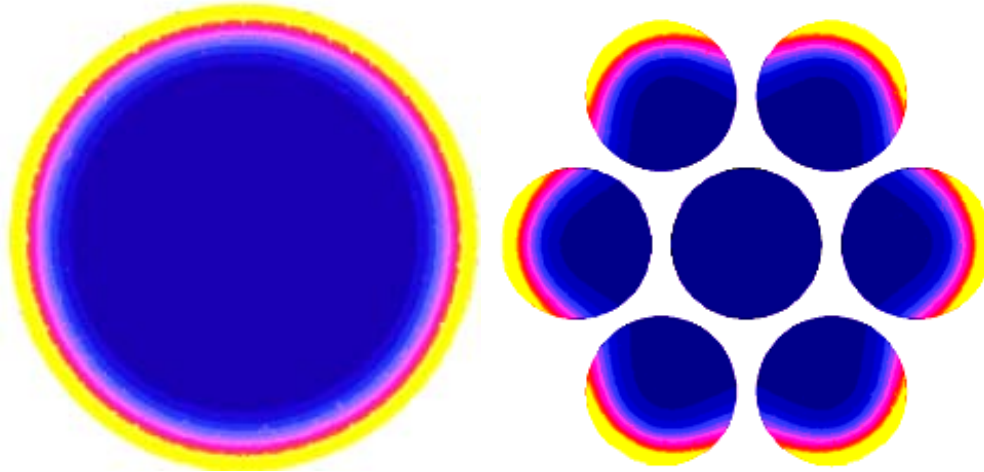
Die Funktion ist sehr komplex.

Stromdichteverteilung einer Litze mit sieben Einzeldrähten im Vergleich

zu einem flächengleichen Volldraht bei einer Frequenz von 150 kHz

Skin-Effekt

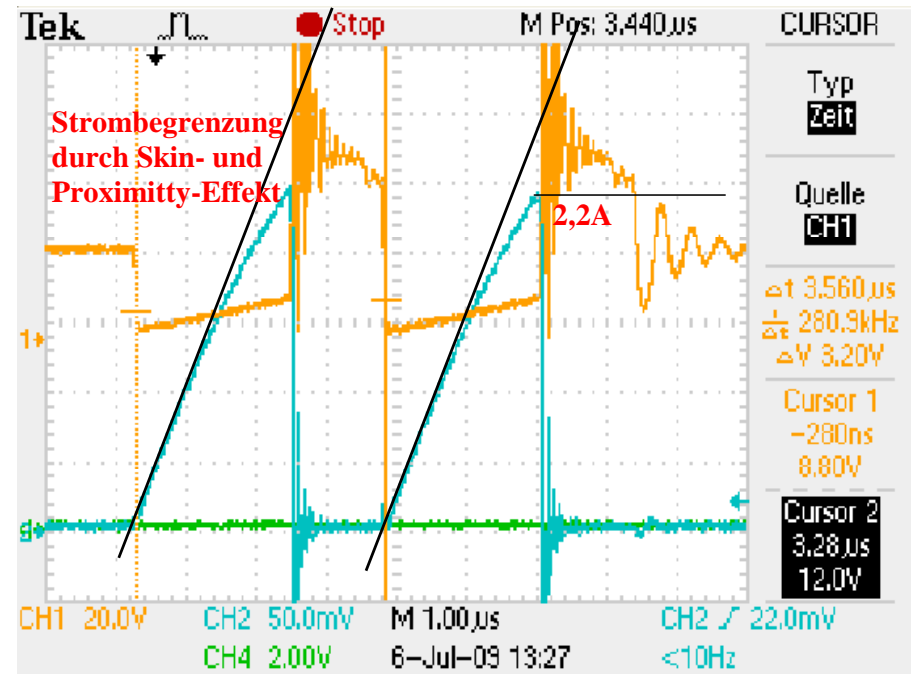
Proximity-Effekt



blau: hochohmig => gelb: niederohmig

lässigen könnte, ist bei der Anordnung mehrerer Runddrähte mit deutlich größeren Verlusten zu rechnen (die Erhöhung durch den Proximityeffekt liegt bei zwei Drähten bei etwa 2,5 %, bei sieben Drähten beträgt die Erhöhung bereits ca. 25 %). Interessant ist hierbei noch der Verlauf der Stromdichte innerhalb der Runddrähte bei symmetrischer Anordnung von sieben Drähten. Der Einfluss der äußeren Drähte auf die anderen äußeren Nachbarn scheint sehr gering zu sein, während der Einfluss auf den mittleren Draht dafür umso größer ist. Würde man die sieben Drähte durch einen einzigen Draht (Volldraht) mit gleichem Gesamtflächeninhalt ersetzen, erhält man eine ähnliche Verteilung der Stromdichte und einen annähernd identischen Widerstand !

Erst wenn die Einzeldrähte so miteinander verflochten werden, dass jeder einzelne Draht über eine gewisse Drahtlänge jede Lage innerhalb des gesamten Querschnitts mit der gleichen Wahrscheinlichkeit einnimmt wie die anderen Drähte, erreicht man eine gleichmäßigere Stromdichteverteilung und somit deutlich geringere Verluste als beim Volldraht. Mit steigender Anzahl von Drähten steigt ebenfalls der Widerstand der einzelnen Drähte infolge des Proximityeffektes. Selbst wenn die Parameter Drahtradius und Frequenz so gewählt werden, dass man die Proximityverluste vernach-



Einfluss von Skin- und Proximity-Effekt (Fly Back)