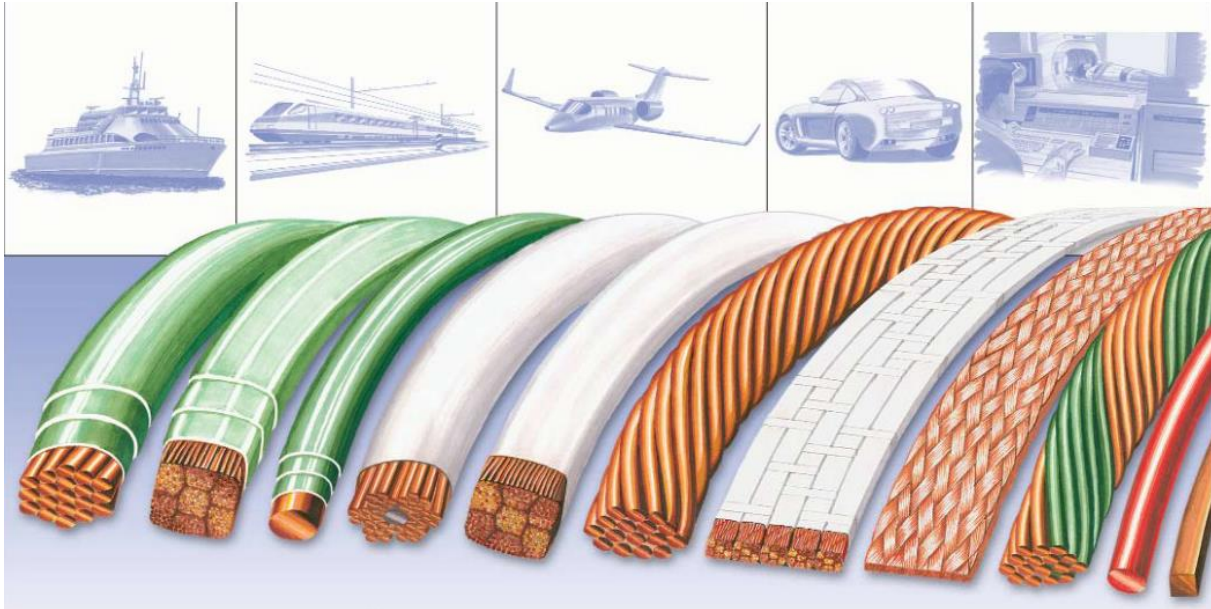


Litzen im Vergleich

Die Reduzierung der Verluste in induktiven Komponenten ist in der Leistungselektronik eine der großen Herausforderungen. In [1] wurden die Berechnung der Wicklungsverluste in Litzen und Runddrähten sowie Möglichkeiten zur messtechnischen Charakterisierung von Litzen vorgestellt. Der folgende Artikel beschreibt die Abhängigkeiten der Verluste von den verschiedenen Litzeparametern und gibt Hinweise zur Auswahl der optimalen Litzen.



Verlustmechanismen in massiven Runddrähten

Die Wicklungsverluste in den Runddrähten können unterteilt werden in

1. die frequenzunabhängigen ohmschen (rms-)Verluste,
2. die frequenzabhängigen Skinverluste und in
3. die von dem äußeren Magnetfeld abhängigen Proximityverluste.

Die bestimmenden Faktoren für die Verluste in einer Wicklung sind der Strom, d.h. insbesondere der Effektivwert (root mean square) des Stromes und der in der zeitabhängigen Stromform enthaltene Oberschwingungsanteil, sowie der Aufbau der Wicklung. Bei einem vom Gleichstrom I durchflossenen Draht können die Verluste mithilfe der einfachen Beziehung $P = I^2 R_0$ berechnet werden, wobei R_0 den ohmschen Widerstand des Drahtes bei der Betriebstemperatur darstellt. Bei zeitabhängigen Strömen wird die Situation bereits wesentlich komplizierter. In den meisten Fällen sind die Ströme zeitlich periodisch mit der Periodendauer $T = 1/f$, so dass sie als Fourier-Entwicklung, bestehend aus Mittelwert und Oberwellenspektrum dargestellt werden können. Ist die Frequenz f hinreichend klein, so dass die mithilfe der Leitfähigkeit κ und der Permeabilität μ_0 des Leitermaterials berechnete Eindringtiefe $\delta = 1/\sqrt{\pi f \kappa \mu_0}$ größer als der Drahtradius a ist, dann ergeben sich die Verluste aus dem Effektivwert des Stromes i_{rms} nach der Beziehung $P = i_{rms}^2 R_0$. Oberschwingungen der Frequenz nf , bei denen die Eindringtiefe $\delta_n = 1/\sqrt{\pi n f \kappa \mu_0}$ kleiner als der Drahtradius wird, erzeugen zunehmend höhere Verluste infolge der Stromverdrängung an die Oberfläche des Drahtes (Skinneffekt).

Skin- und rms-Verluste eines Drahts sind proportional zum Quadrat der Stromamplitude!

Befinden sich die Drähte in einem magnetischen Wechselfeld, das z.B. durch die Ströme in den Nachbardrähten oder durch den Kern und dessen Luftspalte hervorgerufen wird, dann werden zusätzliche Wirbelströme induziert. Die dadurch entstehenden Proximityverluste sind abhängig von der Frequenz und der Amplitude des externen Magnetfelds und damit indirekt vom Wickelaufbau, von der Kernform und der Anzahl, Größe und Position eventuell vorhandener Luftspalte.

Proximityverluste eines Drahts sind proportional zum Quadrat der externen Magnetfeldamplitude!

Eine der Optionen zur Reduzierung der Verluste bei vorgegebener Stromform und ebenfalls vorgegebenem Kern ist die Auswahl einer geeigneten Litze. Diese Thematik steht im Vordergrund der folgenden Abschnitte.

Verlustmechanismen in Litzen

Auch bei Leitungen und Wicklungen aus HF-Litze kann man die Verluste einteilen in

1. Verluste infolge des Stromes durch die Leitung und
2. Verluste infolge eines äußeren Magnetfelds.

Die Verluste unter 1. setzen sich aus drei Anteilen zusammen: aus den rms-Verlusten, den Skinverlusten der einzelnen Litzeadern und den sogenannten inneren Proximityverlusten der Litze. Diese werden dadurch verursacht, dass sich die einzelnen Litzeadern im magnetischen Wechselfeld aller anderen benachbarten Litzeadern der gleichen Leitung befinden. Für eine ideale Litze, bei der der Strom gleichmäßig auf alle Adern verteilt ist, kann dieses Feld einfach bestimmt werden. Seine Amplitude nimmt bei Rundlitzen linear von innen nach außen mit dem Abstand von der Achse zu. In die Messung der frequenzabhängigen Impedanz einer Litze mit einer vorgegebenen Länge gehen immer die drei genannten stromabhängigen Verlustmechanismen mit ein. In einem realen Wickelaufbau werden diese Verluste im Wesentlichen durch die Litzenauswahl beeinflusst, ein geringer Einfluss infolge des Wickelaufbaus ergibt sich durch die sich einstellende Länge der Windungen.

Die stromabhängigen Verluste einer Litze enthalten auch innere Proximityverluste!

Die äußeren Proximityverluste infolge des externen Wechselfelds hängen dagegen wesentlich von dem Wickelaufbau ab, der die Feldverteilung im Wickelraum bestimmt. Sie lassen sich für die einzelnen Litzeadern auf die gleiche Weise wie für massive Drähte berechnen. Meist wird von einem äußeren Feld ausgegangen, das sich über dem Litzequerschnitt nicht ändert, so dass die äußeren Proximityverluste einer Litze berechnet werden können, indem man die Proximityverluste einer einzelnen Ader mit der Adernzahl der Litze multipliziert. Eine zusätzliche Wechselwirkung der einzelnen Adern untereinander kann meist vernachlässigt werden, da sich diese Effekte über das gesamte Litzebündel weitestgehend kompensieren [1].

Äußere Proximityverluste von Litzen berechnet man durch Multiplikation der Proximityverluste einer einzelnen Ader mit der Adernzahl!

Verluste infolge des Stromes im Draht

Wir betrachten zunächst allein die Verluste, die durch den Strom in der Leitung entstehen. Die Vernachlässigung eines externen Magnetfelds ist in der Praxis nur dann gerechtfertigt, wenn einzelne Leitungen verlegt werden und die Abstände zu anderen stromführenden Leitern hinreichend groß sind. Bild 1 zeigt für diesen Fall die Verluste in Abhängigkeit der Fre-

quenz für eine ausgewählte Litze und zum Vergleich für einen Volldraht mit gleichem Kupferquerschnitt. Bei allen folgenden Bildern ist jeweils eine Drahtlänge von 1 m zugrunde gelegt. Im unteren Frequenzbereich verhalten sich beide Drähte gleich. Die erzwungene homogenere Stromverteilung über den Gesamtquerschnitt führt bei der Litze zu einem wesentlich geringeren Widerstand über einen großen Frequenzbereich. Dieser Effekt lässt sich auch damit begründen, dass das Verhältnis von Eindringtiefe zu Drahtradius bei den Litzeadern wesentlich größer ist als bei dem Volldraht und der Skineneffekt erst bei wesentlich höheren Frequenzen einsetzt. Dieser Unterschied ist an der gepunkteten Linie in Bild 1 zu erkennen. Die Verluste infolge des inneren Proximityeffekts, dargestellt als gestrichelte Linie, sind dafür verantwortlich, dass die Gesamtverluste in der Litze oberhalb einer charakteristischen Frequenz die Verluste eines Volldrahts mit gleichem Kupferquerschnitt übersteigen.

Bei hohen Frequenzen bestimmt der innere Proximityeffekt den Verlustwiderstand der Litze!

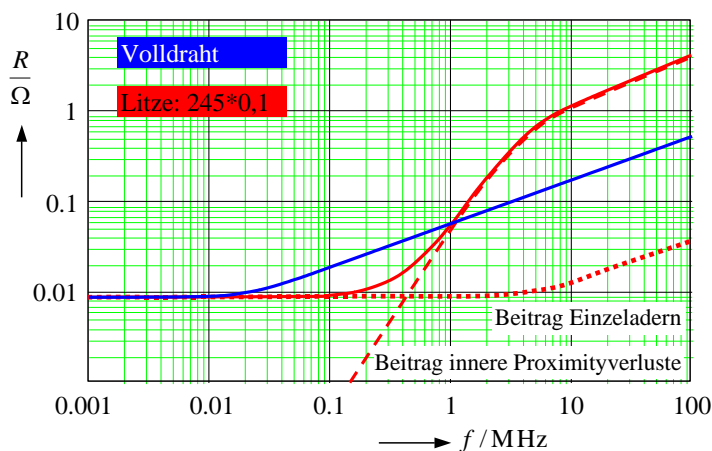


Bild 1. Aufteilung der stromabhängigen Verluste einer Litze, Vergleich zum Volldraht

Eine Reduzierung der Verluste im unteren Frequenzbereich lässt sich nur mit einem größeren Kupferquerschnitt erreichen. Den Einfluss einer höheren Anzahl von Einzeladern bei unverändertem Aderndurchmesser zeigt das Bild 2. Die Erhöhung der Aderanzahl um einen Faktor vier reduziert den Gleichstromwiderstand um den gleichen Faktor. Bei vorgegebener Stromamplitude bestimmt der Kupferquerschnitt der Litze die minimal möglichen Verluste der Leitung. Es zeigt sich aber auch, dass die inneren Proximityverluste praktisch unabhängig von der Aderzahl sind, d.h. die Verluste im oberen Frequenzbereich können durch eine Erhöhung der Aderzahl bei konstant gehaltenem Aderndurchmesser nicht reduziert werden.

Bei hohen Frequenzen sind die inneren Proximityverluste einer Litze unabhängig von der Aderzahl!

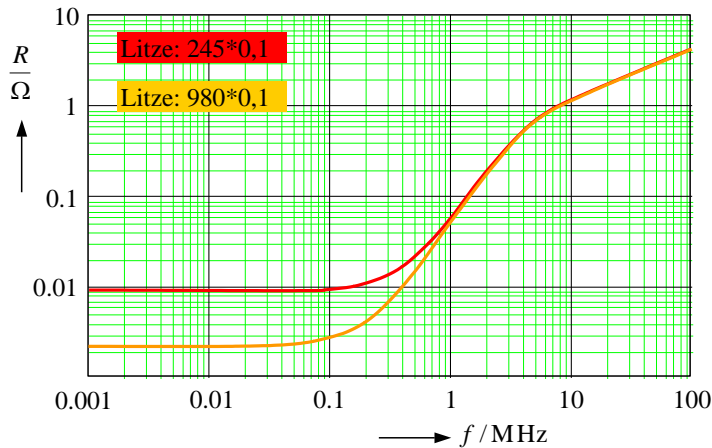


Bild 2. Verlustwiderstände zweier Litzen mit unterschiedlicher Adernzahl und gleichem Aderndurchmesser

Zur Reduzierung der Verluste im oberen Frequenzbereich muss der Aderndurchmesser verkleinert werden. Bild 3 zeigt den frequenzabhängigen Verlustwiderstand für Litzen mit unterschiedlicher Adernzahl aber gleichem Kupfergesamtquerschnitt. Ein Vergleich mit dem Volldraht lässt erkennen, dass die obere Frequenzgrenze, bis zu der eine Litze gegenüber einem massiven Draht Vorteile bringt, durch Verringern des Aderndurchmessers erhöht werden kann. Bild 3 zeigt aber auch, dass für sehr hohe Frequenzen die Litze mit den dünneren Adern die höchsten Verluste aufweist.

Dünnere Adern garantieren nicht immer kleinere Skinverluste!

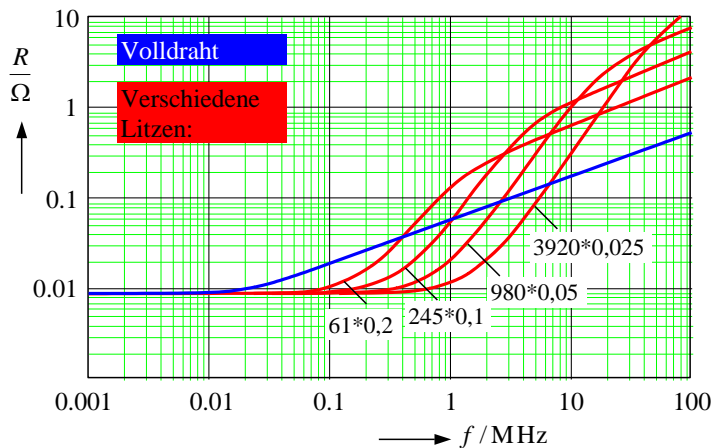


Bild 3. Verlustwiderstände von Litzen mit unterschiedlicher Adernzahl und gleichem Kupfergesamtquerschnitt

Sind Kupferquerschnitt der Litze und Betriebsfrequenz fest vorgegeben, so kann man einen minimalen Aderndurchmesser definieren. Dieser Zusammenhang ist ebenfalls in Bild 3 erkennbar. Bei einer Betriebsfrequenz von 1 MHz weist die Litze 3920*0,025 praktisch den Gleichstromwiderstand R_0 auf. Eine weitere Reduzierung der Aderndurchmesser verbessert die Verlustbilanz praktisch nicht mehr. Zur besseren Vergleichbarkeit der vier Litzen in Bild 3 wurde deren Außendurchmesser gleich gewählt. In der Praxis steigt dieser jedoch mit zunehmender Adernzahl, da die Lackisolation stärker ins Gewicht fällt, so dass die Impedanzen der feiner unterteilten Litzen entsprechend den Ergebnissen im folgenden Bild 4 noch etwas geringer werden.

Bei vorgegebener Frequenz und festem Kupfergesamtquerschnitt bringt eine immer feinere Unterteilung in mehr Adern irgendwann keine Verbesserung mehr!

Zur Reduzierung der Verluste im hohen Frequenzbereich müssen die inneren Proximityverluste minimiert werden. Dazu muss das Magnetfeld an der Stelle der einzelnen Adern infolge des Stromes in den Nachbaradern reduziert werden. Diese Forderung läuft auf eine Abstandsvergrößerung zwischen den Einzeladern hinaus. Eine einfache Realisierungsmöglichkeit besteht darin, die Dicke der Lackisolation auf den Einzeladern zu vergrößern. Durch den größeren Umfang des Litzebündels sinkt die magnetische Feldstärke am Rand und damit auch auf dem gesamten Litzquerschnitt. Bild 4 zeigt für den bereits betrachteten Litzetyp die Verbesserung. Eine Erhöhung des Gesamtdurchmessers um den Faktor 2 reduziert die inneren Proximityverluste und damit den Verlustwiderstand der Litze um den Faktor 4.

Die Verluste einer Litze verkleinern sich im höheren Frequenzbereich, wenn der Abstand zwischen den Einzeladern erhöht wird!

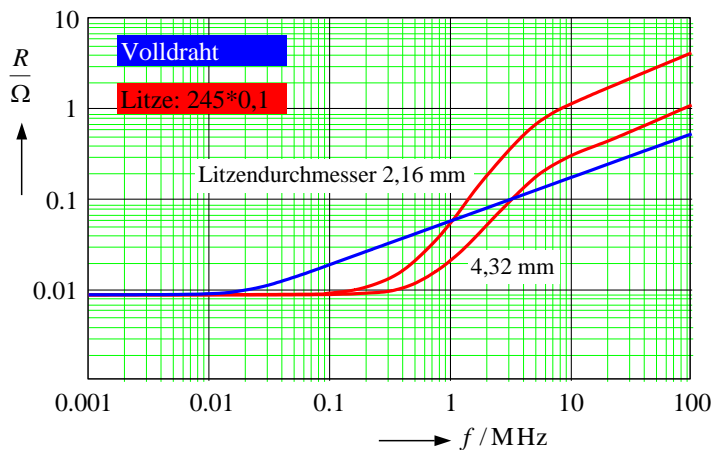


Bild 4. Verlustwiderstände zweier Litzen mit unterschiedlichem Durchmesser des Litzebündels und gleichem Kupfergesamtquerschnitt

Verluste infolge eines äußeren Magnetfelds

In diesem Abschnitt betrachten wir die Verluste in Litzen infolge eines äußeren Magnetfelds. In Wickelanordnungen, z.B. bei Spulen und Transformatoren, sind die Drähte einem starken externen Magnetfeld infolge der Nachbarwindungen und der Luftspalte in den Kernen ausgesetzt. Problematisch wird die Situation bei leistungselektronischen Schaltungen mit großen Strömen und Betriebsfrequenzen im hohen kHz-Bereich, wie z.B. bei Schaltnetzteilen. In diesen Fällen spielen die Verluste infolge des äußeren Proximityeffekts eine dominierende Rolle.

Befindet sich ein Draht der Länge l in einem homogenen externen Magnetfeld der Amplitude \hat{H}_{ext} , dann können die Proximityverluste mithilfe der Beziehung $P_{prox} = l \cdot \hat{H}_{ext}^2 \cdot D_s / \kappa$ berechnet werden. Die ausführlichen Gleichungen sind in [1] bzw. [2] angegeben. Der Proximityfaktor D_s hängt vom Verhältnis von Drahtradius zu Eindringtiefe a/δ ab. Bild 5 zeigt die Werte D_s einer Litze im Vergleich zu ihrem äquivalenten Volldraht. Auch hier zeigt sich, dass die Litze im unteren Frequenzbereich deutliche Vorteile aufweist, oberhalb einer bestimmten Frequenz sind die Verluste beim Volldraht aber wieder geringer. Interessant ist jetzt, dass diese Fre-

quenzgrenze sowohl bei den Verlusten infolge des Stromes nach Bild 1 als auch bei den Verlusten infolge des externen Magnetfelds nach Bild 5 praktisch an der gleichen Stelle liegt. Damit spielt die prozentuale Aufteilung zwischen den beiden Verlustmechanismen für die Auswahl einer Litze keine Rolle.

Proximityverluste können durch die Auswahl einer geeigneten Litze um mehrere Zehnerpotenzen reduziert werden!

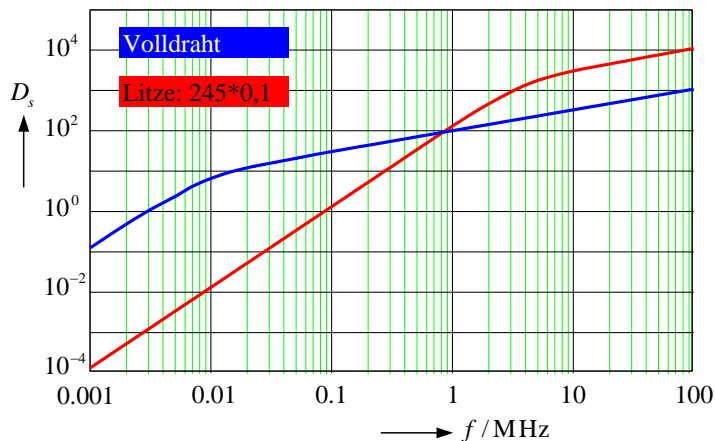


Bild 5. Vergleich der Proximityfaktoren für eine Litze und den äquivalenten Volldraht, (vgl. auch Bild 1)

Als ersten Einflussparameter betrachten wir den Durchmesser der Adern. In Bild 6 sind nochmals die Ergebnisse aus Bild 5 gestrichelt eingezeichnet. Die durchgezogenen Linien beziehen sich auf eine Litze mit gleicher Adernzahl aber halbem Aderndurchmesser. Beim zugehörigen äquivalenten Volldraht ist ebenfalls der Durchmesser gegenüber Bild 5 halbiert.

Proximityverluste können im gesamten Frequenzbereich durch Reduzierung des Drahtdurchmessers bzw. des Aderndurchmessers verringert werden!

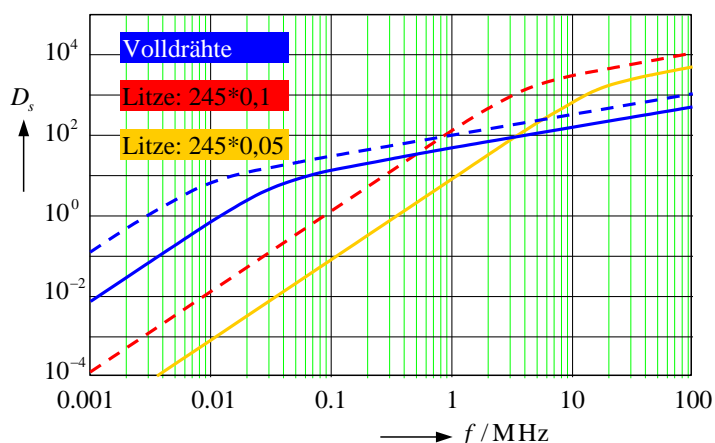


Bild 6. Vergleich der Proximityfaktoren für Litzen mit unterschiedlichem Aderndurchmesser

Der Nachteil bei der Maßnahme in Bild 6 ist der kleinere Kupferquerschnitt und damit ein größerer Gleichstromwiderstand. Den Vergleich von Litzen mit identischen Werten R_0 aber unterschiedlicher Adernzahl zeigt Bild 7. Wir erhalten hier die gleiche Situation wie bereits in Bild 3. Der Schnittpunkt gegenüber dem Volldraht verschiebt sich zu höheren Frequenzen,

allerdings wird die feiner unterteilte Litze bei sehr hohen Frequenzen schlechter als die Litze mit weniger Adern. Ein Vergleich der Schnittpunkte in den Bildern 3 und 7 bestätigt die bereits im Zusammenhang mit Bild 5 gemachten Aussagen.

Bei gleichem Kupferquerschnitt bedeuten dünnere Adern reduzierte Proximityverluste, allerdings nur in einem begrenzten Frequenzbereich!

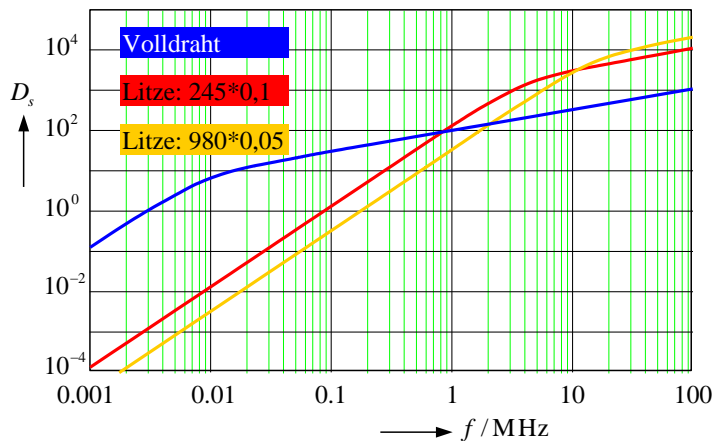


Bild 7. Vergleich der Proximityfaktoren für Litzen mit unterschiedlichem Aderndurchmesser und gleichem Kupfergesamtquerschnitt, (vgl. auch Bild 3)

Aufbau und Form der Litze, wie z.B. der in Bild 4 untersuchte Litzedurchmesser haben praktisch keinen Einfluss auf die äußeren Proximityverluste. Generell gilt, dass die Positionierung der Drähte im Wickelfenster sich an der Feldverteilung orientieren sollte. Wenn möglich, sollten die Windungen an Stellen gelegt werden, wo die magnetische Feldstärke besonders klein ist. Insbesondere der Bereich um die Luftspalte im Spulenkern sollte im Interesse kleiner Wicklungsverluste ausgespart werden.

Zusammenfassung

In der Praxis hängt die Aufteilung zwischen den verschiedenen Verlustmechanismen stark von der Stromform ab. Je höher ein niederfrequenter Anteil im Strom wird, desto größer werden auch die Verluste durch den ohmschen Widerstand der Wicklungen. Diese Verluste können durch Vergrößern des Kupferquerschnitts der Wicklungen verringert werden – zu Lasten der Proximityverluste. Je nach Stromform und Oberwellenspektrum lässt sich eine optimale Litze finden, so dass die Wicklungsverluste minimiert werden können. Ein weiterer wichtiger Aspekt, nämlich die Positionierung der Windungen im Wickelfenster, hat entscheidenden Einfluss auf die externe Feldstärke \dot{H}_{ext} , der die einzelnen Windungen ausgesetzt sind. Dieser Thematik wird ein eigener Beitrag gewidmet.

Eine abschließende Bemerkung zu den bisherigen Betrachtungen muss noch angefügt werden. Zur Verdeutlichung der Einflüsse einzelner Litzenparameter wurden den vorgestellten Berechnungen ideale Litzen zugrunde gelegt. Das nicht ideale Verhalten einer realen Litze in der Praxis setzt sich aber je nach Qualitätsparameter der Litze aus dem Verhalten eines Volldrahtes und dem Verhalten einer idealen Litze zusammen [2]. Die obigen Ergebnisse für die betrachteten Litzen sind daher vor allem qualitativer Natur.

[1] M. Albach et al, Optimale Wicklung = optimaler Wirkungsgrad, Elektronik power, S. 38 – 47, April 2010

- [2] H. Roßmanith et al, Measurement and Characterization of High Frequency Losses in Non-ideal Litz Wires, IEEE Trans. on Power Electronics, 2011, p. 3386-3394



Prof. Dr.-Ing. M. Albach
leitet seit 1999 den Lehrstuhl Elektromagnetische Felder an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Zu den Forschungsgebieten gehören die Maxwellsche Feldtheorie und die Leistungselektronik mit den Schwerpunkten Elektromagnetische Verträglichkeit und induktive Komponenten.
m.albach@emf.eei.uni-erlangen.de



Dr.-Ing. Hans Roßmanith
studierte Elektrotechnik an der Universität Erlangen, wo er auch promovierte. Seit 1993 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter im Department EEI der Universität Erlangen-Nürnberg, seit 1999 am Lehrstuhl für Elektromagnetische Felder. Seine Arbeitsgebiete sind elektromagnetische Feldtheorie, elektromagnetische Verträglichkeit und numerische Feldberechnung.
h.rossmanith@emf.eei.uni-erlangen.de



Dipl.-Ing. Dietmar Exner
ist seit 1999 Assistent der Geschäftsführung bei der Rudolf Pack GmbH & Co. KG. Schwerpunkte seiner Tätigkeit sind die Beratung der Kunden und die Umsetzung der Kundenwünsche im Hause PACK Feindrähte.
dietmar.exner@pack-feindraechte.de