

Products & Technologies



Verlustberechnung von Ferriten unter realen Bedingungen

Oktober 2008

Wirkungsgrade steigern

Ein neues nutzerfreundliches Berechnungsmodell – Nomogramm – für unterschiedliche Ferritmaterialien und Wandlertypen hilft Entwicklern von Stromversorgungen, das jeweils richtige Material auszuwählen. Mit dem von EPCOS entwickelten Nomogramm und den Berechnungen kann der Anwender den Wandler so auslegen, dass die tatsächlichen Kernverluste zum einen bekannt und zum anderen auf ein geringes Maß beschränkt sind. Das erhöht die Energieeffizienz und verringert Kosten sowie Umweltbelastung.

Die magnetische Verlustleistung von Leistungsferriten wird im Wesentlichen bestimmt durch die Hysterese des Materials und damit von der magnetischen Flussdichte. Eine weitere wichtige Rolle spielt die Betriebstemperatur. Die meisten Hersteller von Leistungsferriten bieten in der Regel umfangreiche Messdaten zu den Verlustleistungen in den Ferritkernen an. Allerdings gehen sie bei den Verlustmessungen üblicherweise von einem sinusförmigen magnetischen Fluss aus. In der Anwendung, zum Beispiel in einem Schaltnetzteil, kommen aber sinusförmige Signale praktisch nicht vor.

Die Verlustleistung wird maßgeblich von der Amplitude und der Art des zeitlichen Verlaufs bestimmt, also der Signalform der magnetischen Flussdichte, die bei Betriebstemperatur auf das Material einwirkt. Dadurch sind die von den Herstellern angegebenen, auf idealen Sinuskurven beruhenden Werte nur wenig praxistauglich.

Mit einem von EPCOS entwickelten mathematischen Modell können nun die Verlustleistung berechnet werden, die die tatsächlich beim Anwender vorherrschende Signalform des magnetischen Flusses berücksichtigen. Mit diesen Nomogrammen lassen sich im Rahmen des Entwicklungsprozesses Leistungsferrite auswählen, deren Verhalten den Anforderungen in der Realität am ehesten entspricht.

Die äquivalente sinusförmige Frequenz

Üblicherweise wird die Verlustdichte $p_{v\sin}$ in einem Ferritkern bei sinusförmigem Verlauf der magnetischen Flussdichte B nach der Steinmetz-Gleichung folgendermaßen berechnet:

$$p_{v\sin} = C_m^x f^y B^{t_2} (c_{t_2} T^2 - c_{t_1} T + c_{t_0}) \quad (i)$$

Hierbei sind f die Frequenz, T die Betriebstemperatur und C_m , C_{t_1} , C_{t_2} sowie C_{t_0} Materialkonstanten. Die Terme x und y sind die sogenannten Steinmetz-Frequenz- beziehungsweise Steinmetz-Induktionskoeffizienten, die für Betriebsbedingungen definiert sind.

Für allgemeine nicht sinusförmigen Verläufe der magnetischen Flussdichte erweiterten M. Albach, Th. Durbaum and A. Brockmeyer <1> die Formel wie folgt:

$$p_{vgen} = f C_m f_{\sin eq}^{x-1} B^{t_2} (c_{t_2} T^2 - c_{t_1} T + c_{t_0}) \quad (ii)$$

Products & Technologies

Die Besonderheit ist die Einführung der äquivalenten sinusförmigen Frequenz $f_{\text{sin eq}}$, die sich aus dem periodischen magnetischen Fluss $B(t)$, seiner Signalform und seiner beiden Extremwerte (B_{max} und B_{min}) ergibt:

$$\int_0^{\frac{1}{f}} \left(\frac{d}{dt} B(t) \right)^2 dt = \frac{\pi^2}{2} f_{\text{sin eq}} (B_{\text{max}} - B_{\text{min}})^2 \quad (\text{iii})$$

Für teilweise lineare Verläufe des magnetischen Flusses mit $k-1$ Segmenten pro Periode wird das Integral (iii) durch eine Aufsummierung ersetzt:

$$f_{\text{sin eq}} = \frac{2}{\pi^2} \sum_{k=2}^k \left(\frac{B_k - B_{k-1}}{B_{\text{max}} - B_{\text{min}}} \right)^2 \frac{1}{t_k - t_{k-1}} \quad (\text{iv})$$

Dabei ist die Variable r folgendermaßen definiert:

$$r = \frac{f_{\text{sin eq}}}{f} \quad (\text{v})$$

Aus (i), (ii) und (v) ergibt sich:

$$p_{\text{vgen}} = r^{x-1} p_{\text{v sin}} \quad (\text{vi})$$

r^{x-1} ist demnach das Verhältnis von der tatsächlichen Wandlerverlustleistung zu der Wandlerverlustleistung bei sinusförmigem Signal mit gleicher Frequenz, magnetischer Flussdichte und Betriebstemperatur.

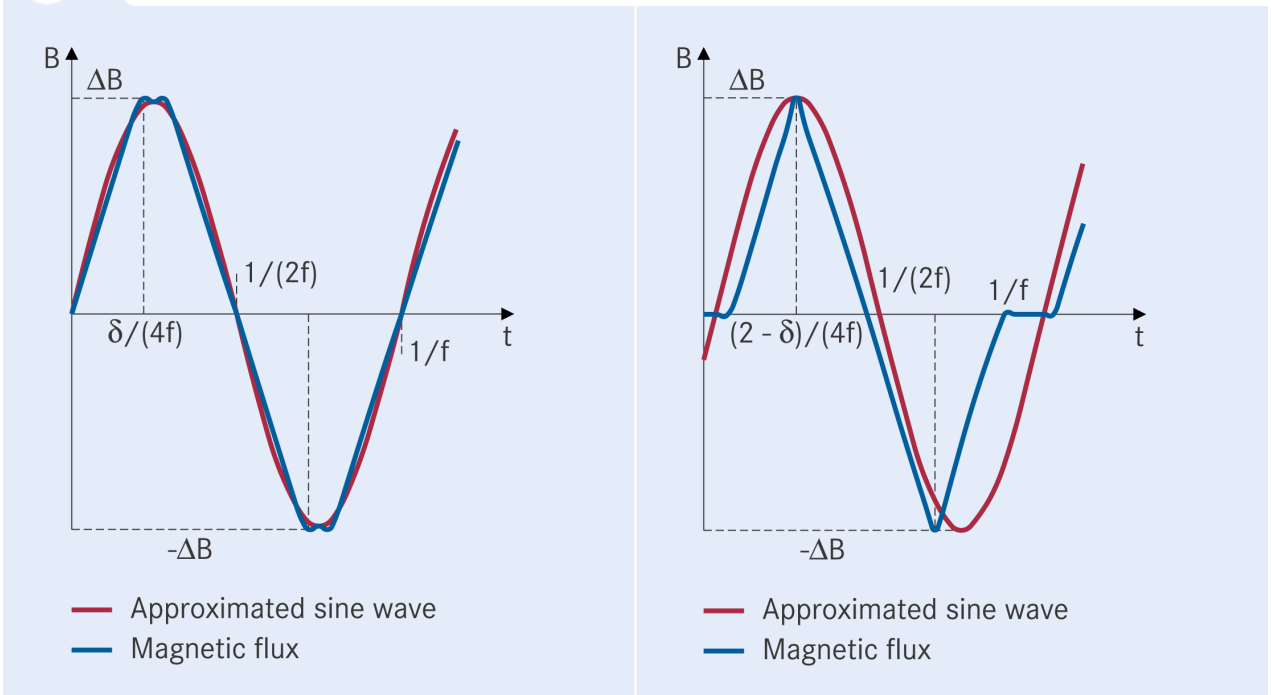
Wichtig ist, dass sämtliche aufgeführten Signalformen des magnetischen Flusses jeweils nur ein Maximum und ein Minimum pro Zyklus aufweisen, so dass es nicht zu mehreren Hystereseschleifen innerhalb eines Zyklus kommt.

Die Abbildungen 1 bis 5 zeigen typische Schaltnetzteil-Topologien sowie deren Flussverlauf. Verglichen wird der Signalverlauf mit einer angenäherten äquivalenten sinusförmigen Wellenform. Das Verhältnis r wird in den drei konkreten Fällen mithilfe des Tastverhältnisses (duty cycle) δ , des Löschzyklus (extinction cycle) ξ und der Resonanzfrequenz f_r beim Resonanzwandler ermittelt.

Products & Technologies



ABBILDUNG 1: GEGENTAKTWANDLER



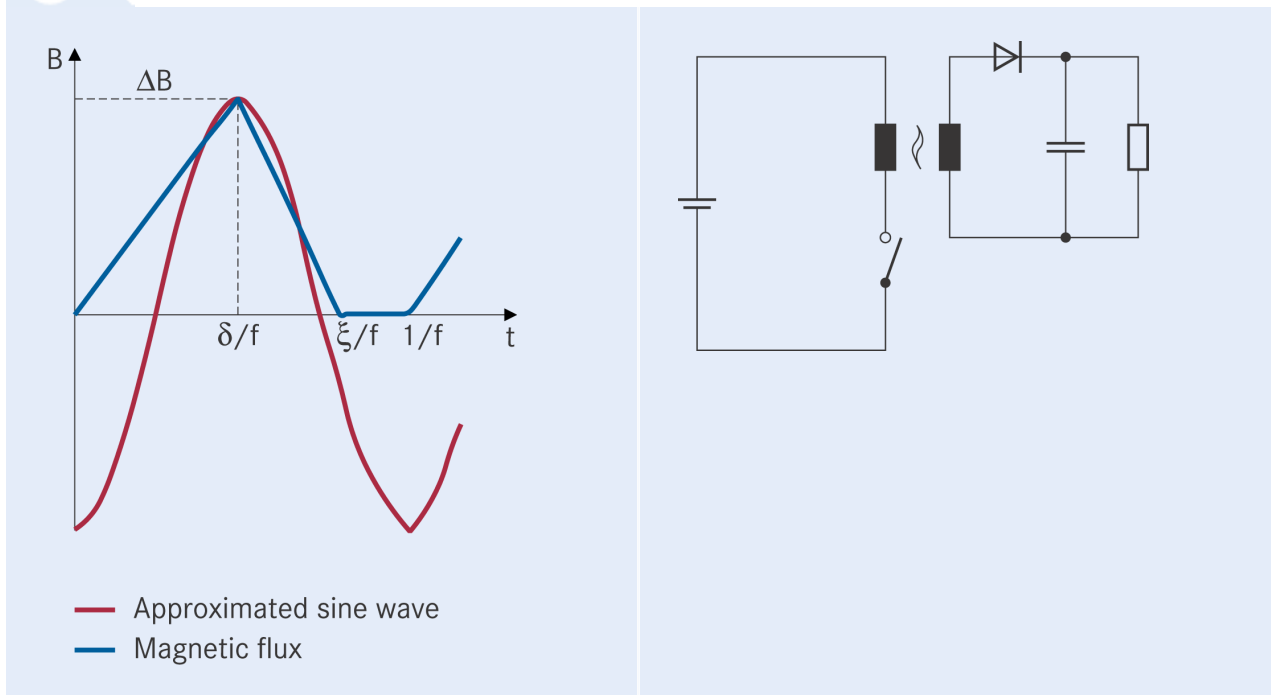
Tastverhältnis: $0 < \delta \leq 1$, daraus folgt in beiden Fällen nach (iv):

$$r = \frac{8}{\pi^2 \delta} \quad (\text{vii})$$

Products & Technologies



ABBILDUNG 2: SPERRWANDLER MIT DISKONTINUIERLICHEM STROMVERLAUF



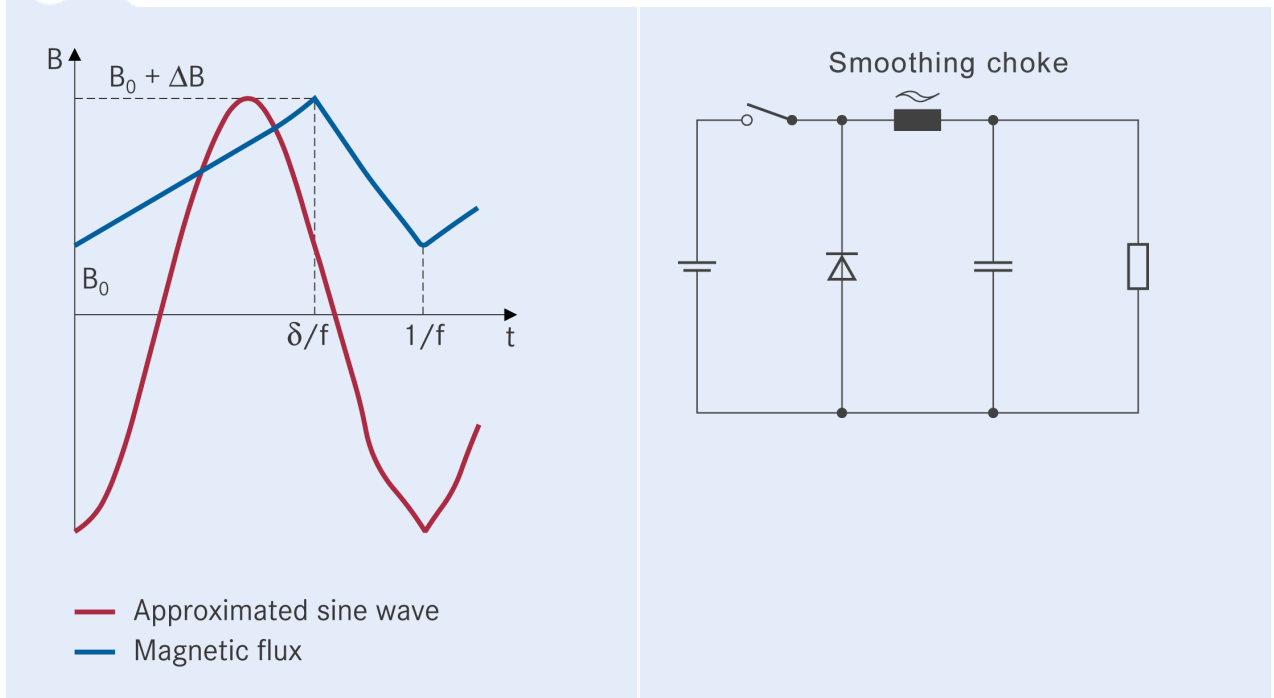
Tastverhältnis: $0 < \delta < \zeta \leq 1$, mit dem Löschzyklus ζ : Daraus folgt nach (iv):

$$r = \frac{2}{\pi^2} \frac{\xi}{\delta(\xi - \delta)} \quad (\text{viii})$$

Products & Technologies



ABBILDUNG 3: SPERRWANDLER MIT KONTINUIERLICHEM STROMVERLAUF



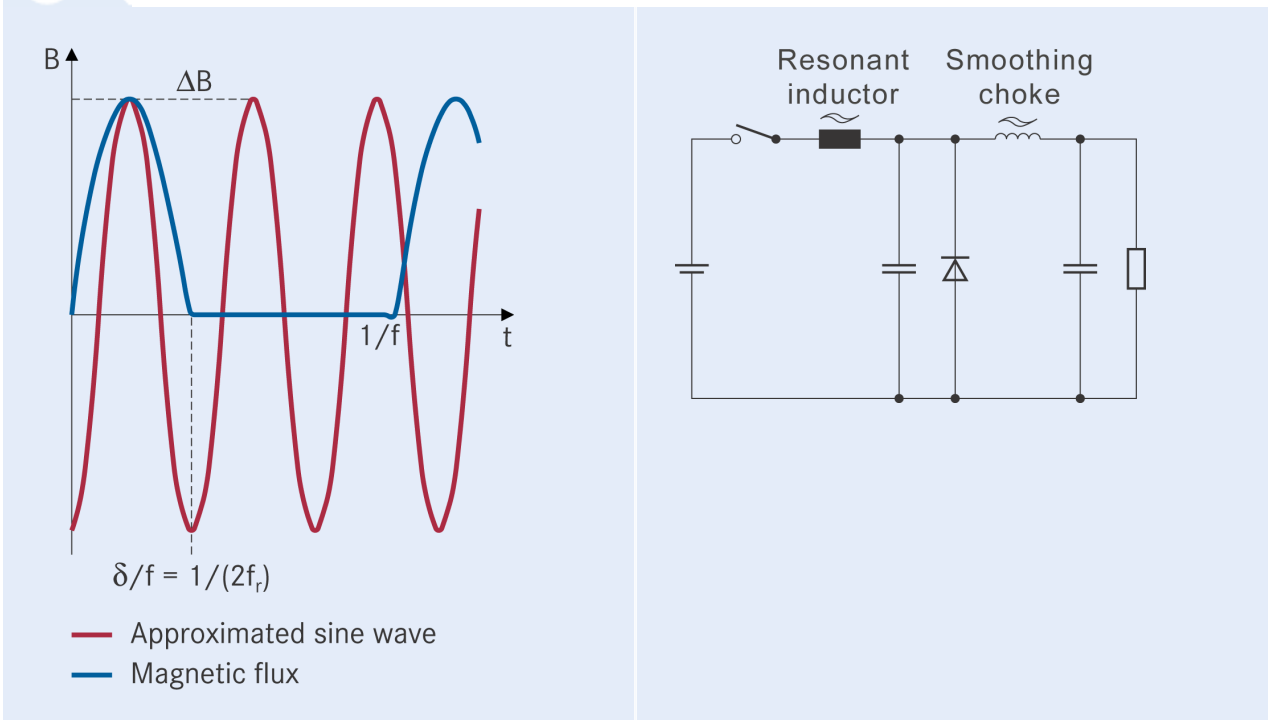
Tastverhältnis: $0 < \delta \leq 1$; daraus folgt nach (iV)

$$r = \frac{2}{\pi^2} \frac{1}{\delta \cdot (1 - \delta)} \quad (\text{ix})$$

Products & Technologies



ABBILDUNG 4: RESONANZWANDLER MIT NULLDURCHGANGS-STROMSCHALTER



Tastverhältnis: $0 < \delta \leq 1$, daraus folgt nach (iii) für die Resonanzfrequenz f_r :

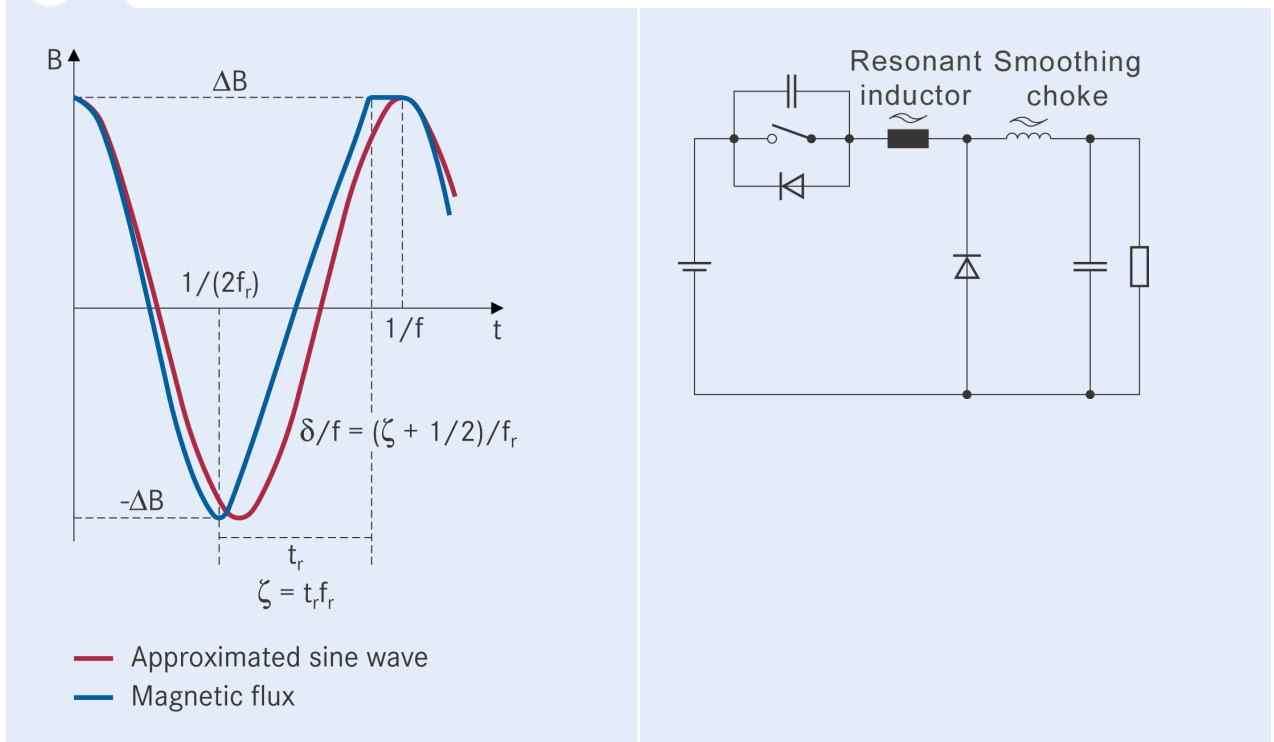
$$2 \cdot f_r = f / \delta \quad \text{und} \quad r = 1 / \delta \quad (x)$$

Somit ergibt sich: $r = 1 / \delta$

Products & Technologies



ABBILDUNG 5: RESONANZWANDLER MIT NULLDURCHGANGS-SPANNUNGSSCHALTER



Der Wert r ergibt sich aus der Resonanzfrequenz f_r , der Ladungs-Erholungszeit der Induktivität und dem Tastverhältnis:

$$r = \frac{2}{\pi^2} \frac{\left(\frac{1}{2} + \zeta\right) \left(\frac{\pi^2}{4} + \frac{1}{\zeta}\right)}{\delta} \quad (\text{xi})$$

wobei $\zeta = t_r \cdot f_r$ ist.

Verhältnis ideal zu real

Die Abhängigkeit des Wertes r von der Schaltungstopologie zeigt, dass r unterschiedlich auf die Veränderung des Tastverhältnisses reagiert (Abb. 6 und 7 in der ergänzenden PDF-Datei). So erhöht sich r mit kleiner werdendem Tastverhältnis beim Gegentaktwandler (push-pull) sowie beim Resonanzwandler beide mit Nulldurchgangs-Stromschalter und Nulldurchgangs-Spannungsschalter. Beim Sperrwandler hingegen nimmt r bei asymmetrischen Tastverhältnissen zu.

Das Verhältnis r^{x-1} zwischen den realen Wandlerverlusten und denen mit sinusförmigem Signal erhöht sich mit dem magnetischen Fluss, sobald sich das Tastverhältnis 1 nähert (symmetrisch beim Sperrwandler), wird aber kleiner bei niedrigen Tastverhältnissen (asymmetrisch beim Sperrwandler). Siehe dazu Abb. 8 und 9 in der ergänzenden PDF-Datei. Umgekehrt verhält sich r^{x-1} mit ansteigender Temperatur: Es sinkt bei Tastverhältnissen, die sich gegen 1 annähern, und steigt bei niedrigen Tastverhältnissen an (Abb. 10 und 11 in der ergänzenden PDF-Datei). Daher sollte der Arbeitspunkt des Wandlers eher bei niedrigen Temperaturen und höheren B-Amplituden liegen, wenn das Tastverhältnis sehr klein ist (asymmetrisch bei Sperrwandlern). Für Tastverhältnissen, bei denen $r < 1$ ist, sind das Verhältnis $r^{x-1} < 1$ und die tatsächliche Verlustleistung geringer als bei sinusförmigem Flussverlauf.

Products & Technologies

Products & Technologies

Nomogramm als Hilfe für Entwickler

Aus den oben ausgeführten Überlegungen und Berechnungen hat EPCOS ein nutzerfreundliches Nomogramm für die Ferritmaterialien N49, N87, N92, N95 und N97 sowie für unterschiedliche Wandlertypen entwickelt. Weitere veränderbare Parameter sind die Betriebsfrequenz (zwischen 25 und 1000 kHz), die magnetische Flussdichte (zwischen 25 und 300 mT), die Betriebstemperatur (zwischen 25 °C und 120 °C) sowie die Tastverhältnisse.

Aus dem Nomogramm lassen sich folgende Daten ablesen: r , r^{x-1} in Abhängigkeit des Tastverhältnisses, p_{vgen} in Abhängigkeit von der Temperatur, der magnetischen Flussdichte und der Frequenz. Das Nomogramm hilft deshalb nicht nur dabei, das richtige Material auszuwählen, sondern auch den Wandler so auszulegen, dass die reale Verlustleistung zum einen bekannt und zum anderen möglichst niedrig ist.

Autor: Probal Mukherjee, Ferrites Development, EPCOS India