

WHITEPAPER

Exakte Bestimmung von Spulenverlusten mit REDEXPERT®



Ranjith Bramanpalli

01. EINLEITUNG UND THEORETISCHER HINTERGRUND

Leistungsverluste bei Schaltnetzteilen treten meistens in Form von Schaltverlusten und Verluste der induktiven Bauelemente auf. Verluste der induktiven Bauelemente erfolgen im Kern und den Wicklungen von Speicherdrosseln und Überträgern. Die exakte Bestimmung dieser Verlustleistung ist für das Konstruieren zuverlässiger Systeme mit hohem Wirkungsgrad heutzutage wichtiger denn je – besonders beim Energiesparen. Zur Abschätzung der Kernverluste bei Schaltnetzteilen können komplexe Messaufbauten erforderlich sein, und doch lässt sich nicht garantieren, dass die vorgenommene Abschätzung für die spezifische Anwendung zutrifft. Kernverluste wurden anfangs mit der Steinmetzgleichung und seit einiger Zeit mit deren Erweiterungen berechnet. Diese Gleichungen erlauben allerdings nur für bestimmte Bedingungen oder Materialien eine zuverlässige Abschätzung der Verluste. Aus diesem Grund wurde von Würth Elektronik eiSos ein neues Modell nach aktuellem Stand der Technik entwickelt, mit dem sich Kernverluste effektiv und genau ermitteln lassen. Dieses Modell wurde in unserem neuen Entwicklungswerkzeug REDEXPERT implementiert.

02. ENERGIESPEICHERUNG IN INDUKTIVEN BAUELEMENTEN

In Schaltnetzteilen dient die Speicherdrossel als Speicherkomponente: Sie speichert Energie in Form eines Magnetfeldes während der Einschaltphase des Schaltreglers und gibt diese Energie während der Ausschaltphase an die Last ab. Die Speicherdrossel besteht üblich aus einer mit Kupferdraht gefertigten Spule und einem Kern mit magnetischen Eigenschaften. Aus der elektromagnetischen Physik wissen wir, dass, wenn eine magnetomotorische Kraft an eine Spule angelegt wird, diese im zeitlichen Verlauf einen Magnetfluss $\vartheta(t)$ induziert. An jeder Stelle ist die Magnetflussdichte B stets proportional zur Feldstärke H .

$$B(t) = \mu_r \mu_0 H(t) \quad (1)$$

B ist die magnetische Flussdichte (ϑ/A), μ_r ist die Permeabilität des Materials, μ_0 die Permeabilität der Luft und H die magnetische Feldstärke.

Die Spule ist wahlweise um den Kern gewickelt oder darin untergebracht. Der Kern enthält einen Luftspalt, um das magnetische Feld effektiv zu nutzen. Der Kern ist in der Regel aus Ferritmaterial mit ferromagnetischen Eigenschaften und einer sehr viel höheren Permeabilität als Luft. Aus der Reihenschaltung des hohen Luftspaltwiderstands mit dem widerstandsarmen Ferritmaterial, wird der Großteil der Energie im Luftspalt gespeichert.

Spulen unterliegen dem ampèreschen wie dem faradayschen Gesetz. Das ampèresche Gesetz setzt den Strom in der Spule oder den Drahtwicklungen zum Magnetfeld im Spulenkern ins Verhältnis. Zur Annäherung wird angenommen, dass das Magnetfeld im Drosselkern über die gesamte Kernlänge (l_e) gleichförmig ist. Aufgrund dieser Annahme können wir das ampèresche Gesetz wie folgt formulieren:

$$H \cdot l_e = N \cdot I \quad (2)$$

Hierbei ist N die Anzahl der Wicklungen der Spule um den Drosselkern und I der Spulenstrom.

Nach dem faradayschen Gesetz beträgt die an der Spule angelegte Spannung

$$U(t) = N \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \quad (\text{bzw.}) \quad U = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (3)$$

Aus den obigen Gleichungen lässt sich der Spulenwert wie folgt berechnen:

$$L = \mu \frac{A_C n^2}{l_e} \quad (4)$$

Hierbei ist A_C die Querschnittsfläche des Kerns.

Da Ferritmaterialien eine hohe Permeabilität aufweisen, stellen sie aufgrund des niedrigen magnetischen Widerstands einen einfachen Weg für den Magnetfluss dar. Diese Eigenschaft unterstützt den Fluss im Drosselkern, was die Konstruktion von Drosseln mit hohen Induktivitätswerten bei geringen Abmessungen ermöglicht. Dieser Vorteil ist aus der obigen Induktivität-Gleichung klar

ersichtlich: Ein Kernmaterial mit hoher Permeabilität ermöglicht eine kleinere Querschnittsfläche.

Bei Schaltnetzteilen lässt sich die maximale Magnetflussdichte wie folgt berechnen:

$$B_{pk} = \frac{L}{N \cdot A_c} \cdot \frac{di}{dt} \quad (5)$$

Auch gekoppelte Drosseln (auch Sperrwandler-Übertrager) sind Spulen, nur mit mehreren Wicklungen. Diese Wicklungen sind komplexer zu betrachten, aber die Kerneigenschaften bleiben hiervon unberührt.

03. LEISTUNGSVERLUSTE

Leistungsverluste treten bei Spulen in den Wicklungen und im Kern auf und heißen folglich Wicklungs- bzw. Kernverluste.

3.1 Wicklungsverluste

Die Leistungsverluste in den Wicklungen entstehen aufgrund des Gleichstromwiderstands (R_{DC}) der Wicklungen, des Skin-Effekts und des Proximity-Effekts. Leistungsverluste aufgrund des Gleichstromwiderstands lassen sich mit der folgenden Gleichung näherungsweise bestimmen:

$$P = I^2 \cdot R_{DC} \quad (6)$$

Die durch den Skin- und den Proximity-Effekt bedingten Leistungsverluste werden als Wechselstromwiderstand (R_{AC}) der Wicklung bezeichnet, der in erster Linie von der Frequenz abhängt. Es gibt einige Methoden zur Ermittlung dieser Effekte in magnetischen Bauteilen, doch sind zur näherungsweisen Bestimmung dieser Verluste komplizierte Vorgänge wie die Dowell-Methode nötig.

3.2 Kernverluste

B wird gemessen, während H erhöht wird. Die Ansprechcharakteristik von B zu H ist nicht linear und zeigt eine Hysterese (daher die Bezeichnung Hysteresekurve). Die Hysterese stellt die Eigenschaften des Kernmaterials dar, die zum Leistungsverlust im Spulenkern führen. Abbildung 1 zeigt eine typische BH-Kurve bei sinusförmiger Anregung des Kerns.

Der Energieverlust eines Schaltzyklus im Kern entspricht der Differenz zwischen der Magnetenergie, die dem Kern während der Einschaltphase zugeführt wird, und der Magnetenergie, die während der Ausschaltphase aus dem Kern abgezogen wird. Dies wird verursacht durch die Elementarmagnete, die in der Ausschaltphase nicht von

alleine in die Ausgangslage zurückfallen, sondern mit Energieaufwand zurückgestellt werden müssen.

Unter Verwendung des ampèreschen und des faradayschen Gesetzes lässt sich die Energie im Kern wie folgt ausdrücken:

$$E = \int H dB \quad (7)$$

Der Energieverlust im Kern ist der von der BH-Kurve umschlossene Bereich multipliziert mit dem Kernvolumen. Der Leistungsverlust entspricht dem Produkt aus diesem Energiewert (E) und der Schaltfrequenz.

Dieser Ausdruck ist unter den Bedingungen gültig, dass der Kern nicht in die Sättigung gefahren wird und die Schaltfrequenz im vorgesehenen (linearen) Betriebsbereich liegt. Der Bereich der Hysteresekurve (in Abbildung 1 rot gekennzeichnet) stellt den Energieverlust dar. Der Leistungsverlust hängt davon ab, wie häufig pro Sekunde die Hysteresekurve durchlaufen wird. Insofern stehen die Hystereseverluste in direktem Zusammenhang mit der Frequenz.

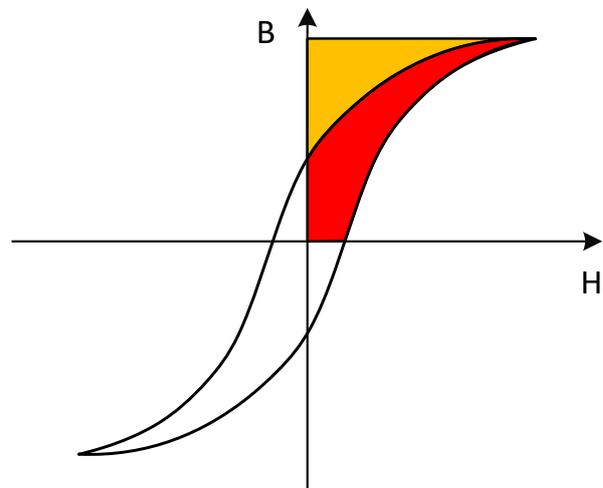


Abbildung 1: BH-Kurve

Die zweite Form der Kernverluste entstehen durch Wirbelströme, die durch einen zeitlich veränderlichen Fluss $d\phi/dt$ im Kernmaterial induziert werden. Nach der Lenz'schen Regel wird durch eine Änderung eines Magnetflusses ein Strom induziert, der seinerseits einen Magnetfluss induziert, der dem ursprünglichen Fluss entgegenwirkt. Dieser Wirbelstrom fließt durch das leitfähige Kernmaterial und erzeugt I^2R Verluste.

04. ERMITTLUNG DER VERLUSTE

Anfänglich wurden Kernverluste mithilfe der Leistungsgleichung (8) ermittelt, die auch als Steinmetz-Gleichung bekannt ist.

$$P_v = K \cdot f^\alpha \cdot B_{pk}^\beta \quad (8)$$

Hierbei sind P_v die Kernverluste (bedingt durch Hysterese und Wirbelströme) je Volumeneinheit, f die Frequenz, B_{pk} die höchste Flussdichte einer sinusförmigen Anregung und K , α und β die Konstanten, die aus dem in Abbildung 2 gezeigten Kernverlustdiagramm abgeleitet werden.

Die in Abbildung 2 für die Kernverluste angegebenen Daten umfassen gewöhnlich die Verluste sowohl der Hysterese als auch der Kernwirbelströme. Die Messung der Kernverluste ist schwierig, weil hierfür komplexe Aufbauten zur Messung der Flussdichte erforderlich sind, und zudem eine Schätzung der Fläche der Hysteresekurve notwendig ist. Zum Zeichnen dieser Kurven wird eine Sinuswelle an den Ringkern mit ein oder zwei je eingängigen Spulenwicklungen angelegt. Dann werden viele Daten generiert, um das Kernverlustdiagramm zu erstellen. Auf der Basis des Diagramms in Abbildung 2 werden die Konstanten abgeleitet.

Der wesentliche Nachteil der Steinmetzgleichung besteht darin, dass sie vor allem für sinusförmige Anregungen gilt. In Anwendungen der Leistungselektronik ist die Spule aber vor allem nichtsinusförmigen Magnetflusswellenformen ausgesetzt. Zwar gibt es auch andere Modelle, die das Problem nichtsinusförmiger Wellenformen durch Trennung von Hysterese- und Wirbelstromverlusten zu lösen versuchen, doch hat sich die empirische Steinmetzgleichung als nützlichste Variante erwiesen und bietet für sinusförmige

Magnetflusswellenformen eine hohe Genauigkeit bei einfacher Nutzung. Deswegen gibt es für diese Leistungsgleichung Erweiterungen, die sie auch für nichtsinusförmige Magnetflusswellenformen nutzbar machen sollen.

Zur Schätzung der Kernverluste mithilfe der Steinmetzgleichung für nichtsinusförmige Wellenformen wird seit einiger Zeit eine Erweiterung namens MSE (Modified Steinmetz Equation, (9)) verwendet.

$$P_v = \left(K \cdot f_{eq}^{\alpha-1} \cdot B_{pk}^\beta \right) \cdot f \quad (9)$$

Hierbei gilt:

$$f_{eq} = \frac{f}{2 \pi \cdot (DC - DC^2)} \quad (10)$$

f_{eq} ist die äquivalente Frequenz bezogen auf die Änderung im Tastverhältnis für nichtsinusförmige Wellenformen.

Aufgrund der mit MSE einhergehenden Nachteile wurde dann die GSE (Generalized Steinmetz Equation) entwickelt, die wir in nachfolgender Gleichung sehen.

$$P_v = \left(K \cdot f_{eq}^\alpha \cdot B_{eq}^\beta \right) \quad (11)$$

Hier gilt:

$$B_{eq} \text{ ist } \frac{1}{4} \int_0^T \left| \frac{dB}{dt} \right| dt \quad (12)$$

Aus diesem Grund basieren auch GSE- und MSE-Kernverlustdiagramme auf einer sinusförmigen Erregung. Es

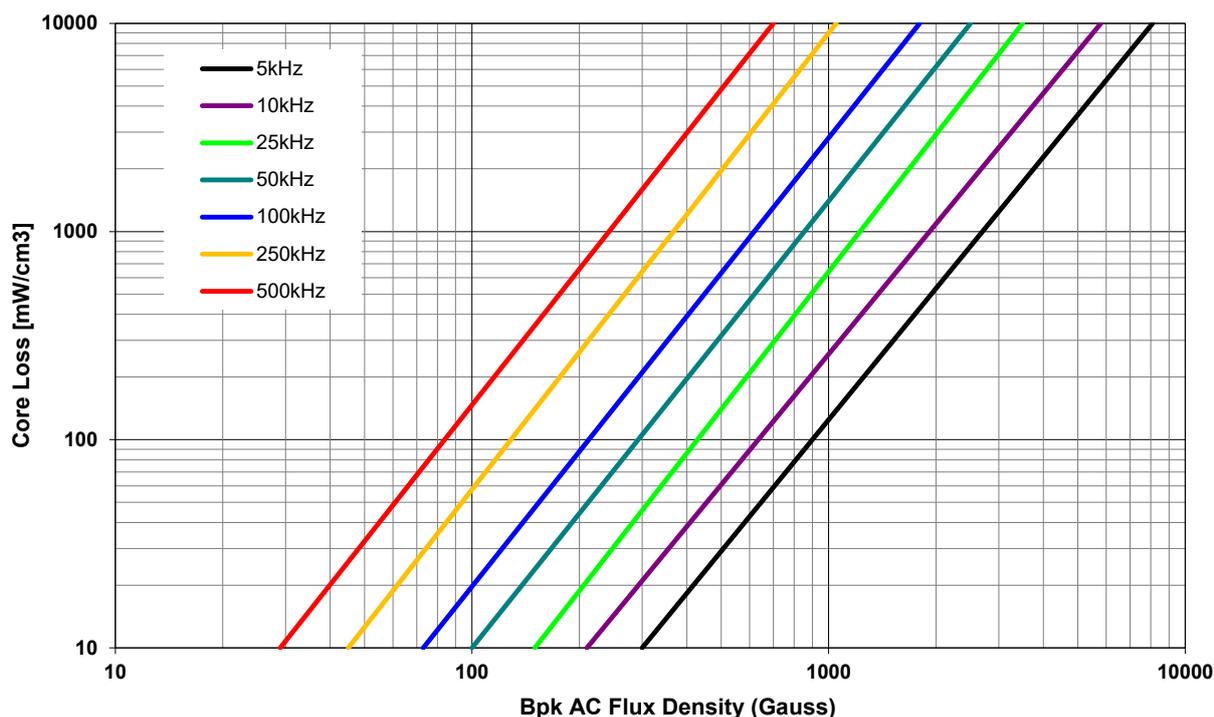


Abbildung 2: Kernverlustdiagramm bezogen auf die maximale Magnetflussdichte bei unterschiedlichen Frequenzen

gelten zudem einige Einschränkungen, die weiter unten noch behandelt werden.

Es gibt auch noch eine Reihe alternativer Modelle, die von den Kernherstellern entwickelt wurden, welche sich optimal für Kerne einsetzen lässt, die von genau diesen Herstellern hergestellt werden.

Folgende wesentliche Nachteile gelten für das Steinmetzmodell und seine Erweiterungen:

- Abhängigkeit von den empirischen Daten der Kernhersteller: Zum Erstellen von Kernverlustdiagrammen muss auf die Daten des Kernherstellers zurückgegriffen werden. Hersteller passiver Bauteile haben keinen Einfluss auf den Testaufbau.
- Geringe Genauigkeit bei Puls- und Dreieckswellenformen, da die Kernverlustdiagramme auf Daten basieren, die durch eine sinusförmige Anregung entstehen.
- Aufgrund von Fehlern bei der Parameterkonvertierung funktioniert die Erweiterung des Steinmetzmodells nur bei einem Tastverhältnis von 50 % und einem beschränktem Frequenzbereich optimal.
- Beschränkung auf Bauteile, die aus bestimmten Materialien bestehen oder von bestimmten Herstellern stammen.
- Wegen der hohen Komplexität bei der Schätzung der Magnetweglänge ist die Schätzung der Kernverluste mithilfe bestehender Modelle für Eisenpulver- und Metal Alloy-Materialien nicht nur anspruchsvoll, sondern die Genauigkeit ist auch starken Schwankungen unterworfen.
- Aufgrund der zeitlichen Veränderungen in der Magnetflussdichte entstehen auch in den Wicklungen Verluste infolge von Skin- und Proximity-Effekten usw. Die oben beschriebenen Ansätze berücksichtigen auch keine Wechselstromverluste der Wicklung.
- Bei Bauteilen, die aus mehreren Materialien bestehen, ist eine Schätzung der Verluste nicht möglich.
- Hohe Komplexität von Aufbauten, um empirische Daten ausreichender Genauigkeit zu ermitteln.

05. DAS WECHSELSTROMVERLUSTMODELL VON WÜRTH ELEKTRONIK

Würth Elektronik eiSos hat ein hochmodernes Modell entwickelt, mit dem Kunden die passende Induktivität mit hoher Effektivität auswählen, und ihre Schaltung optimieren können. Dieses Modell basiert auf den empirischen Daten, die mit einem Echtzeitanwendungsaufbau gewonnen werden.

Beim Modell von Würth Elektronik eiSos werden die Gesamtverluste der Induktivität in Wechselstrom- und Gleichstromverluste unterteilt. Die Leistungsverluste aufgrund des Gleichstroms in den Spulenwicklungen werden als Gleichstromverluste, die Leistungsverluste infolge der magnetischen Aussteuerung in der Spule und im Kern als Wechselstromverluste bezeichnet.

Empirische Daten werden mit einem DC-DC-Wandler erfasst, wie er in Abbildung 3 gezeigt ist. An die Induktivität wird eine pulsierende Spannung angelegt, dann werden die Eingangsleistung P_{in} und die Ausgangsleistung P_{out} gemessen. Auf dieser Basis wird $P_{Loss} = P_{in} - P_{out}$ geschätzt und die Wechselstromverluste der Spule P_{AC} werden separiert. Dieser Vorgang wird für unterschiedlichste Parametereinstellungen – beispielsweise Schwankungen der magnetischen Aussteuerung, Frequenz, Ripplestrom, usw. – gemessen, um so die empirischen Daten aufzeichnen zu können. Mithilfe dieser empirischen Daten wird das Modell zur Berechnung der Wechselstromverluste erstellt: $P_{AC} = f(\Delta I, \text{freq}, DC, k1, k2)$.

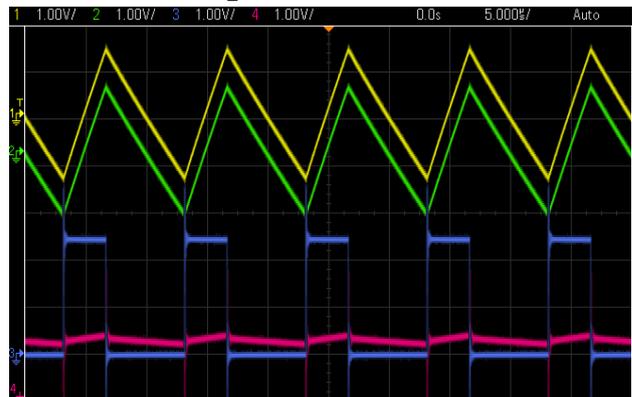
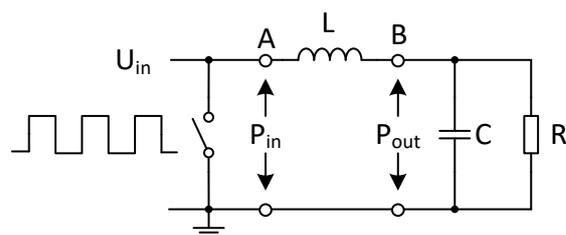


Abbildung 3: Aufbau des DC-DC-Wandlers zur Verlustbestimmung und resultierende Aufnahmen

Die in den Datenblättern für typische Kernmaterialien gezeigte Hysteresekurven stellen die magnetische Aussteuerung von + nach – des Kerns durch eine sinusförmige Wellenform dar. Die Hysteresekurve gibt dabei den in Abbildung 4 oben dargestellten Energieverlust an. Dieser Ansatz ist mit dem zur Erzeugung empirischer Daten für die in Abbildung 2 gezeigten Kernverlustdiagramme identisch.

Bei einer Schaltnetzteilanwendung jedoch wird der Kern normalerweise durch eine wesentlich kleinere Rechteckwellenform mit einer maximalen Flussdichte betrieben, die durch die Kernverluste auf eine kleinere Hysteresekurve beschränkt wird (Abbildung 4 unten). Der Leistungsverlust hängt davon ab, wie häufig pro Sekunde die Hystereseschleife durchlaufen wird. Insofern stehen die Hystereseverluste in direkter Abhängigkeit zur Frequenz. Die Hysteresekurve ändert ihre Form bei Änderungen der Wellenform, des Antriebsstroms bzw. der Antriebsspannung und der Temperatur. Diese Schwankungen machen eine genaue Vorhersage der Kernverluste ausgesprochen schwierig. Die kleinere Hysteresekurve hängt von der Spannung über der Drossel ab. Diese kleinere Hysteresekurve wird genau am Arbeitspunkt zur Erzeugung empirischer Daten für das Wechselstromverlustmodell von Würth Elektronik verwendet. Es hat sich als robust und präzise für weite Bereiche von Parametern wie Frequenz, Ripplestrom und Tastverhältnis erwiesen.

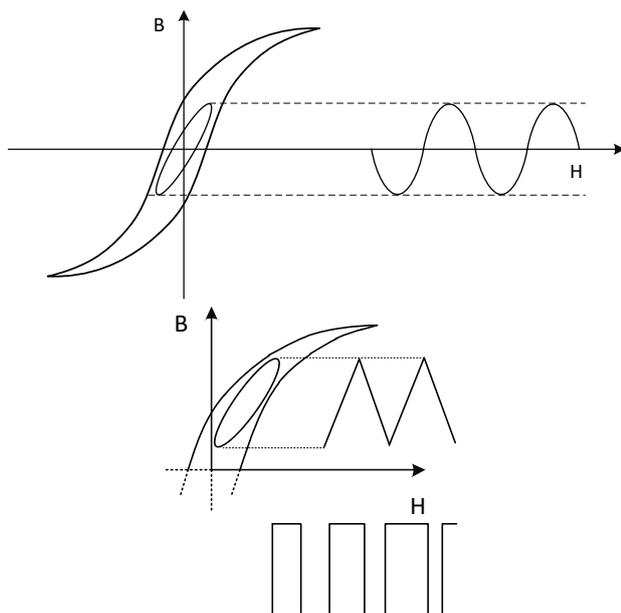


Abbildung 4: Typische umfassende Signalmodellierung zur Verwendung für die Steinmetzgleichung und ihre Erweiterungen (oben und Hilfsschleifenmethode von Würth Elektronik (unten))

Vorteile des AC-Verlustmodells von Würth Elektronik:

- Da die empirischen Daten ausschließlich auf Echtzeitparametern basieren, lässt sich eine genaue Ermittlung der Verluste für jedes gegebene Tastverhältnis erzielen.
- Das Modell funktioniert über einen weiten Frequenzbereich (10 kHz - 10 MHz) sehr genau, da die Konstanten der Leistungsgleichung über einen weiten Bereich ermittelt wurden, unter Einbeziehung der magnetischen Aussteuerung.
- Sogar geringfügige Änderungen im Kernmaterial und der Wicklungsstruktur werden berücksichtigt.
- Ist gültig für Bauteile aus mehr als einem Material.
- Gestattet exakte Ermittlung von Verlusten bei Eisenpulver und neuen „Metal Alloy“ Materialien.
- Gültig für beliebige Kernformen und Wicklungsstrukturen.
- Beinhaltet AC-Wicklungsverluste.

06. LEISTUNGSFÄHIGKEIT DES AC VERLUSTMODELLS VON WÜRTH ELEKTRONIK

Das Modell von Würth Elektronik wurde ausgiebig validiert und mit bestehenden Modellen und gemessenen Daten verglichen. Wechselstromverluste für verschiedene Materialien wie WE-Superflux, Eisenpulver, NiZn, MnZn usw. werden über große Tastverhältnis- und Frequenzbereiche gemessen und mit theoretischen Modellen verglichen (Abbildung 5 - Abbildung 9). In den nachfolgenden Diagrammen sind die mit der Steinmetz-Leistungsgleichung (Pst), Modified Steinmetz Equation (Pmse) und Generalized Steinmetz Equation (Pgse) ermittelten Kernverluste dargestellt. REDEXPERT ist der Wechselstromverlust nach Berechnung mit dem AC-Verlustmodell von Würth Elektronik. Real ist der gemessene AC-Verlust.

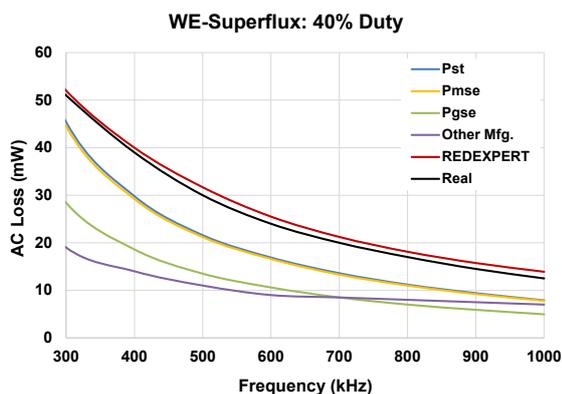


Abbildung 5: Drossel aus WE-Superflux bei 40 % DC

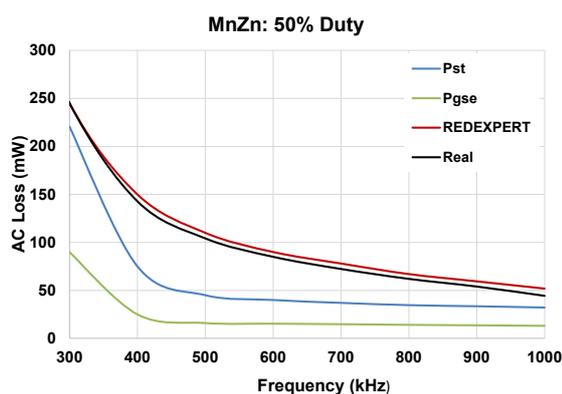


Abbildung 6: Drossel aus MnZn bei 50 % DC

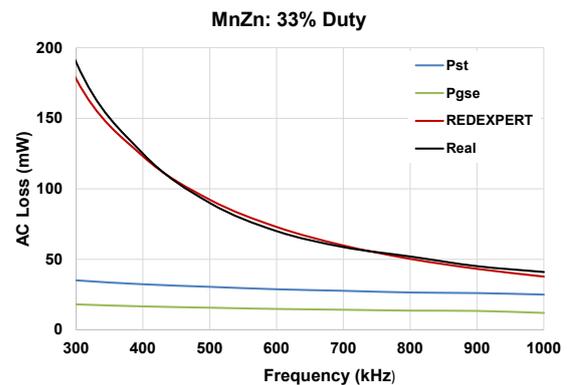


Abbildung 7: Drossel aus MnZn bei 33 % DC

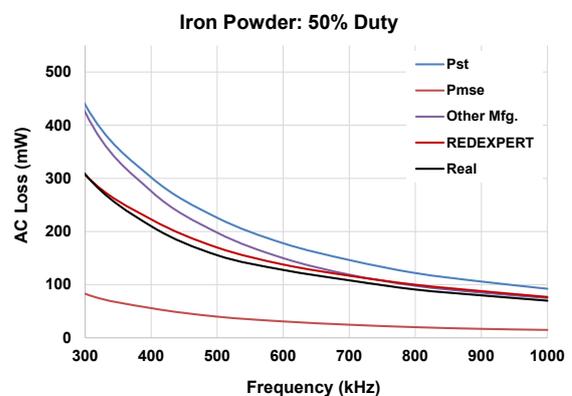


Abbildung 8: Drossel aus Eisenpulver bei 50 % DC

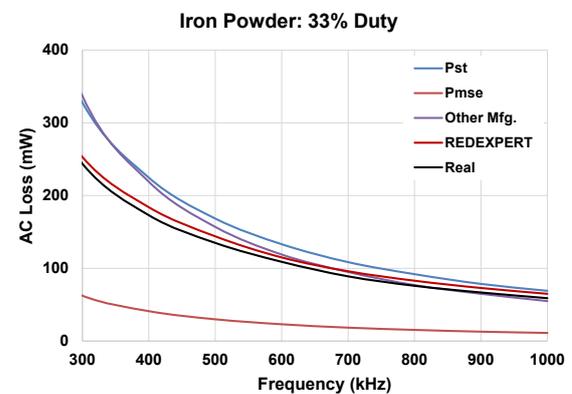


Abbildung 9: Drossel aus Eisenpulver bei 33 % DC

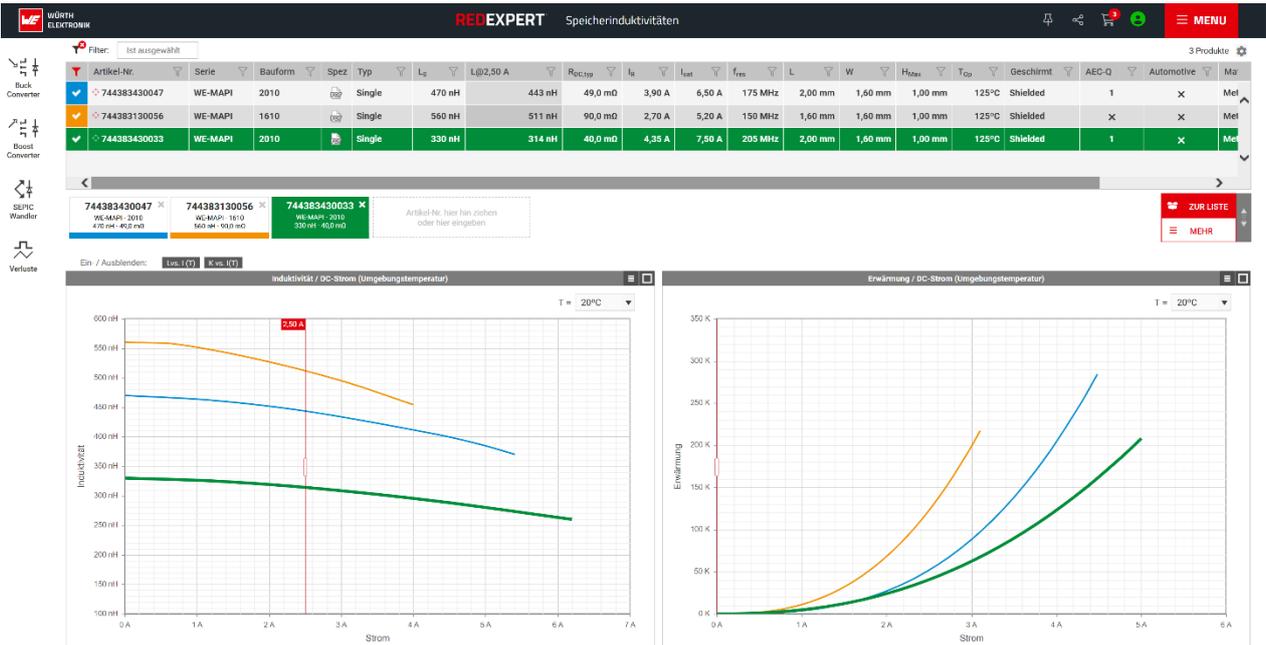


Abbildung 10: Das Online-Tool REDEXPERT

07. BESTIMMUNG DER LEISTUNGSVERLUSTE BEI DROSSELN MIT REDEXPERT

REDEXPERT ist das Onlinetool zur Bauteilauswahl- und -simulation von Würth Elektronik, mit dem der Kunde unkompliziert eine für die jeweilige Anwendung geeignete Speicherdrossel auswählen kann. REDEXPERT ist ein einfach zu bedienendes und effektives Tool, mit dem Entwickler Induktivitäten in kürzester Zeit vergleichen und auswählen können. Zunächst gibt der Benutzer die Eingangs- und Ausgangsparameter in die gewünschte Topologie ein. Dann berechnet REDEXPERT den Induktivitätswert und zeigt die passenden Induktivitäten an. Abbildung 10 zeigt eine Bildschirmaufnahme des REDEXPERT-Webtools.

Da Würth Elektronik eiSos eine sehr umfangreiche Palette von Speicherdrosseln für alle möglichen Einsatzzwecke anbietet, sollte jeder Benutzer nach Eingabe der Parameter ein für seine Zwecke geeignetes Bauteil finden. Die Berechnung der AC Verluste in einem magnetischen Bauteil ist ebenso kritisch wie komplex, nicht jedoch mit REDEXPERT, da das neue AC-Verlustmodell von Würth Elektronik in das Tool integriert ist. Aufgrund der genauen Berechnung der kompletten AC-Verluste eignet sich die Anwendung auch zur Temperaturabschätzung.

Abbildung 11 zeigt ein Beispiel. Hier wurde ein Tiefsetz-Wandler ausgewählt. Als Eingangsspannung werden 8 - 12 V angegeben, als Ausgangsspannung 5 V, Schaltfrequenz 800 kHz, ein Ripplestrom der Induktivität

von 40 % und als Ausgangsstrom 1 A. Für diese Werte hat REDEXPERT eine optimale Induktivität (L_{opt}) von 9,6 μH , eine Einschaltdauer von 550 ns und ein Tastverhältnis von 0,44 berechnet. Für dieses Beispiel werden mehr als 200 Produkte zur Auswahl vorgeschlagen. Gehen wir in diesem Beispiel davon aus, dass für die Anwendung eine sehr kleine und verlustarme Speicherdrossel benötigt wird, so entscheiden wir uns für ein Exemplar aus der WE-MAPI-Baureihe.

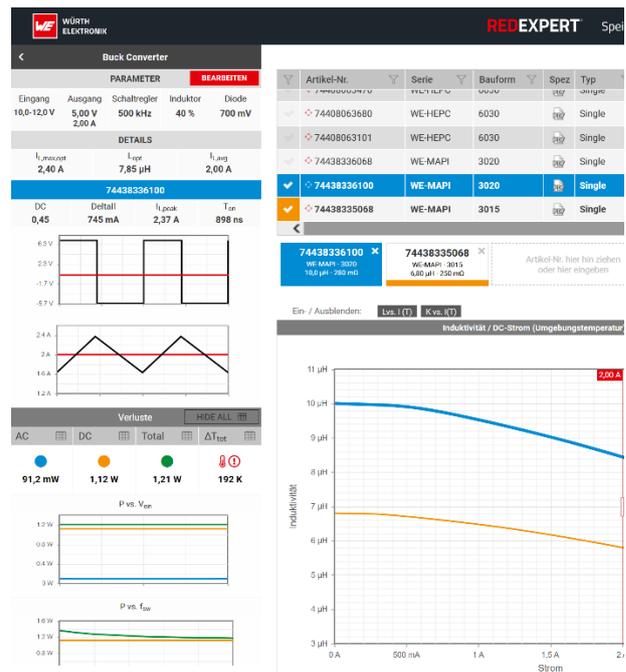


Abbildung 11: Beispiel mit Buck-Wandler

Gegenwärtig unterstützt REDEXPERT drei Topologien, bei denen der Kunde das Bauteil für die Anwendung auswählen kann: Aufwärts-, Abwärts- und SEPIC-Wandler. Außerdem gibt es einen Verlustrechner, welcher unabhängig von der Topologie die Verluste für Speicherdrosseln berechnet. REDEXPERT ist ein webbasiertes Tool, d.h., der Benutzer muss es weder herunterladen noch sich um die Aktualisierung kümmern.

08. ZUSAMMENFASSUNG

Das Wechselstromverlustmodell von Würth Elektronik ist ein genaues und praktisches Modell zur Bestimmung von Wechselstromverlusten. Das Modell wurde über weite Wertebereiche für die Parameter Frequenz, Ripplestrom und Tastverhältnis experimentell validiert und hat sich als sehr robust erwiesen. Aufgrund der Tatsache, dass dieses Wechselstromverlustmodell in REDEXPERT implementiert ist, muss der Benutzer keine Kernverlustdiagramme mehr anfordern. REDEXPERT ist ein Online-Tool zur Berechnung von Schaltreglern, mit dem Entwickler bei der Bestimmung von Verlusten und der Auswahl geeigneter Bauteile eine Menge Zeit sparen.

A Anhang

A.1 Literatur/Quellen

- [1] Magnetics Design for Switching Power Supplies by Lloyd H. Dixon
- [2] On the law of hysteresis by C.P. Steinmetz
- [3] "Calculation of losses in ferro- and ferrimagnetic materials based on the modified Steinmetz equation" by Reinert, J.; Brockmeyer, A.; De Doncker, R.W.
- [4] "Improved calculation of core loss with nonsinusoidal waveforms by Jieli Li; Abdallah, T.; Sullivan, C.R.