

APPLICATION NOTE



Ermittlung der idealen Speicherinduktivität für energieeffiziente Anwendungen

ANP031 VON ALEXANDER GERFER, RANJITH BRAMANPALLI, JOCHEN BAIER

1. Einleitung

Energieeffiziente Geräte sind wichtige Bausteine, um Ressourcen zu sparen und die Umwelt zu schonen.

Je effizienter die Elektronik ist, umso länger ist bei mobilen Geräten die Batterielebensdauer und in großen Industrie- und Serveranlagen mit tausenden von Verbrauchern reduziert sich spürbar der Energiebedarf.

Die Basis für energieeffiziente Geräte wird maßgeblich mit vom Netzteil beeinflusst. Waren früher noch Linearregler die meistverwendeten Spannungsregler, so sind in modernen Leistungselektroniken überwiegend Schaltnetzteile zu finden. Das kontinuierliche Verringern der Prozessorspannungen hat seinen Teil dazu beigetragen. Vor wenigen Jahren waren noch Schaltfrequenzen bis 300 kHz sehr verbreitet, doch takten moderne Schaltregler meist mit Frequenzen von 800 kHz und mehr. Die Schaltverluste einerseits, aber auch die Verluste der Speicherdrossel auf der anderen Seite sind wichtige Punkte im Design von Schaltnetzteilen.

Neue Materialmischungen der Eisenalloygruppe haben die Kernmaterialverluste für Hochstrom-Speicherdrosseln weiter reduziert. Eine neue Baureihe ist dabei die Serie WE-MAPI, die durch geschickte Materialauswahl und Fertigungstechnologie die bestmögliche Ausnutzung von Induktivität und Stromtragfähigkeit bei geringen Eigenverlusten vereint.

Ein neues Tool – REDEXPERT – hilft dem Entwickler durch ein messtechnisch gestütztes Verfahren die bis heute genauesten Daten der Gleich- und Wechselstromverluste von Speicherdrosseln in der Applikationsumgebung zu bestimmen. Die Kernverlustberechnung basierend auf Steinmetzformeln stößt da sehr schnell an die Grenzen.

2. Aufbau und Eigenschaften der WE-MAPI

Die WE-MAPI ist die neueste und innovativste Spulenserie von Würth Elektronik. Bei herkömmlichen Spulen wird meist der Kupferlackdraht um den Kern gewickelt und mit einem Clip an das Terminal gelötet oder geschweißt. Anschließend wird der äußere Schirmring montiert, und mit dem inneren Kern und der Wicklung verklebt.

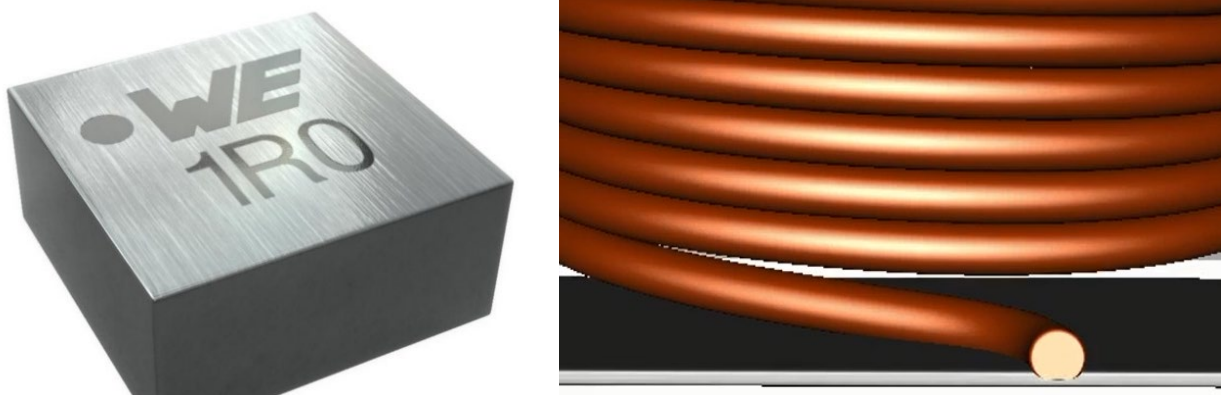


Abbildung 1: Ansicht der WE-MAPI und die direkte Kontaktierung des Drahtes mit den Anschlusspads

Bei der WE-MAPI werden neue Wege beschritten, und die Wicklung wird mit einem Direktkontaktverfahren ohne Löt- und Schweißarbeiten direkt mit den Anschlusspads des Bauteils kontaktiert. Durch die Einsparung des Clips konnte der effektive Durchmesser vergrößert werden, was zur Folge hat, dass weniger Windungen für

APPLICATION NOTE



Ermittlung der idealen Speicherinduktivität für energieeffiziente Anwendungen

gleiche Induktivitätswerte benötigt werden. Dies drückt sich in einem deutlich reduzierten Gleichstromwiderstand (R_{DC}) der Wicklung aus.

In der Anwendung wird in Regel der Start der Wicklung der Spule mit dem Schaltknoten des Schaltreglers verbunden – das Bauteil trägt dazu eine Markierung. Dadurch wird die räumliche Ausdehnung des „heißen“ Schaltknotens minimiert und Kopplungseffekte durch den äußeren, auf „ruhigem“ Potential bezogenen Teil der Wicklung werden mit abgeschirmt

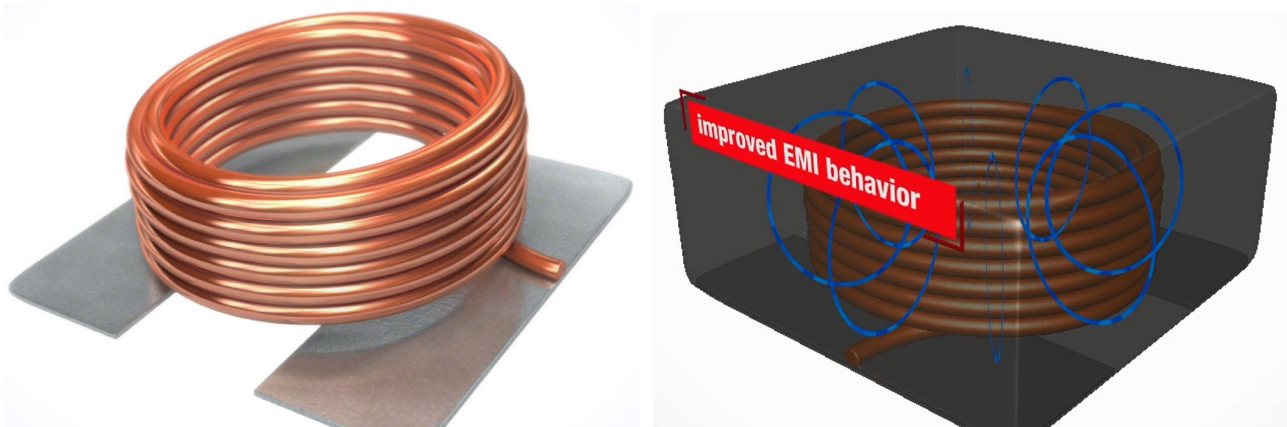


Abbildung 2: Selbstschirmende Wicklung und Kernkonstruktion für verbessertes EMV-Verhalten der WE-MAPI

Der Kern besteht aus einer innovativen Metallalloylegierung, die um die Wicklung herum gepresst wird. Dies verleiht der WE-MAPI hohe Induktivitätswerte bei kleiner Bauform. Die besondere Konstruktion des Kerns hat zugleich eine **selbstschirmende Wirkung**. Das Kernmaterial selbst ist temperaturstabil mit nur geringem Drift und weichem Sättigungsverhalten. Zusätzlich wird um den Kern eine Schutzschicht aufgebracht, um die Oberflächen resistent gegen Umwelteinflüsse zu machen.

Die WE-MAPI ist in vielen verschiedenen Bauformen erhältlich, von $1,6^2 \times 1,0$ mm, bis hin zu $4,0^2 \times 2,0$ mm.



Abbildung 3: Übersicht der verfügbaren Bauformen der WE-MAPI

3. Verluste in Speicherinduktivitäten

Die Verluste einer Speicherdrossel setzen sich zusammen aus Kernmaterialverlusten und Wicklungsverlusten. Die Wicklungsverluste selber lassen sich unterteilen in Gleichstromverluste, maßgeblich beeinflusst durch den Gleichstromwiderstand der Wicklung

$$P = I^2 \cdot R_{DC}$$

und den Wechselstromverlusten (R_{AC}) der Wicklung, die sich durch den Skin- und Proximity-Effekt ergeben. Es gibt einige Methoden zur Ermittlung der AC-Verluste der Wicklung - z.B. die Dowell-, Ferreira- oder Nan/Sullivan-Methode.

APPLICATION NOTE



Ermittlung der idealen Speicherinduktivität für energieeffiziente Anwendungen

Welchen Stellenwert in modernen Schaltreglern die AC-Verluste haben, lässt sich mit einem simplen Aufbau und der Messung der entsprechenden Verluste ermitteln. Als Beispiel nehmen wir einen Tiefsetzsteller mit einer Eingangsspannung von 24 V. Am Ausgang sind es 12 V mit 2 A. Getaktet wird mit 500 kHz. In dem Vergleich in Abbildung 4 wurde eine Speicherinduktivität mit 2,2 μH der Serie WE-MAPI 4020 vermessen, und mit bauformgleichen Speicherinduktivitäten verglichen. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei allen vermessenen Spulen die AC-Verluste die DC-Verluste übertrumpfen.

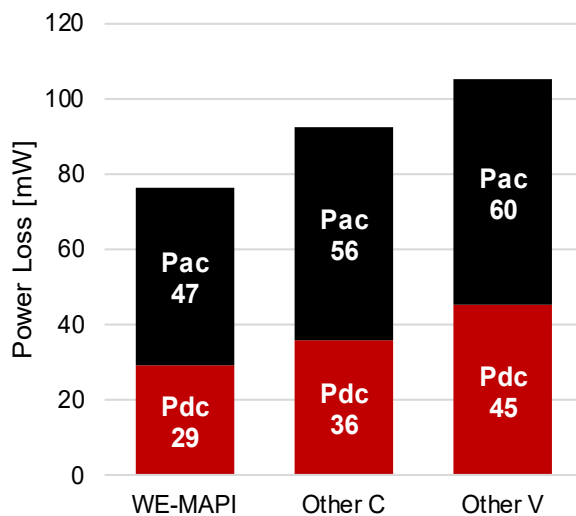


Abbildung 4: AC und DC Verluste einer 2,2 μH -Spule, Tiefsetzsteller mit 24 V zu 12 V, 2 A, 500 kHz

In Schaltreglern ist die Spule eines der wichtigsten Bauelemente. Deshalb ist die genau Ermittlung der Verluste und Erwärmung ein kritischer Schritt bei der Auswahl des richtigen Bauelements. Um die Erwärmung vorhersagen zu können, müssen zunächst die AC-Verluste genau ermittelt werden.

3.1. Die Steinmetz-Modelle

Historisch betrachtet wurden Kernverluste mit dem Steinmetz-Modell (1), und später mit dem Modifiziertem Steinmetz-Modell (2) oder dem Generalisierten Steinmetz-Modell (3) ermittelt:

$$P_v = K \cdot f^\alpha \cdot B_{pk}^\beta \quad (1)$$

$$P_v = \left(K \cdot f_{eq}^{\alpha-1} \cdot B_{pk}^\beta \right) \cdot f \quad \text{mit} \quad f_{eq} = \frac{f}{2\pi \cdot (DC - DC^2)} \quad (2)$$

$$P_v = \left(K \cdot f_{eq}^\alpha \cdot B_{eq}^\beta \right) \cdot f \quad \text{mit} \quad B_{eq} = \frac{1}{4} \int_0^T \left| \frac{dB}{dt} \right| dt \quad (3)$$

Wobei P_v die Kernverluste pro Volumeneinheit sind, f die Schaltfrequenz, und B_{pk} die magnetische sinusförmige Aussteuerung. f_{eq} ist die äquivalente Frequenz die sich bei einem abweichenden Tastverhältnis einer nicht-sinusförmigen Aussteuerung ergibt. K , α & β sind die Konstanten des Kernmaterials, die durch aufwendige Messungen mit einem Ringkern ermittelt wurden.

APPLICATION NOTE



Ermittlung der idealen Speicherinduktivität für energieeffiziente Anwendungen

Der wesentliche Nachteil der Steinmetzgleichung besteht darin, dass sie vor allem für sinusförmige Anregungen gilt, und in der Ermittlung der Koeffizienten i.d.R. nur mit Kleinsignalen gemessen wird.

In den meisten Anwendungen der Leistungselektronik ist der Spulenstrom aber nicht-sinusförmig. Und die Ströme sind Großsignale von einigen mA bis hin zu einigen hundert Ampere.

Es gibt auch andere Modelle, die das Problem nicht-sinusförmiger Wellenformen durch Trennung von Hysterese- und Wirbelstromverlusten zu lösen versuchen. Dort hat sich die empirische Steinmetzgleichung als nützliche Variante erwiesen, bietet aber nur für sinusförmige Ströme eine hohe Genauigkeit. Allerdings arbeiten die verschiedenen Steinmetzmodelle optimal nur bei einem Tastverhältnis von 50 % und in einem beschränkten Frequenzbereich. Zudem ist wegen der hohen Komplexität bei der Ermittlung der magnetischen Weglänge die Ermittlung der Kernverluste mit Hilfe bestehender Modelle für Eisenpulver und Metalllegierungen nicht nur anspruchsvoll, sondern die Genauigkeit ist auch starken Schwankungen unterworfen. Und bei Induktivitäten, die aus mehreren verschiedenen Kernmaterialien bestehen, ist eine Schätzung der Verluste nicht oder nur sehr aufwändig möglich.

3.2. Das Würth Elektronik Modell

Würth Elektronik eiSos hat ein hochmodernes Modell entwickelt, um die kompletten AC-Verluste in Induktivitäten präzise ermitteln zu können. Dieses Modell basiert auf den empirischen Daten, die mit einem Echtzeitanwendungsaufbau gewonnen werden. Hierbei werden die Gesamtverluste der Induktivität in Wechselstrom- und Gleichstromverluste unterteilt.

Empirische Daten werden mit einem DC/DC-Wandler erfasst, wie er in Abbildung 5 dargestellt ist. An die Induktivität wird eine pulsierende Spannung angelegt, wobei die Eingangsleistung P_{in} und die Ausgangsleistung P_{out} gemessen werden. Auf dieser Basis wird $P_{loss} = P_{in} - P_{out}$ ermittelt und die Wechselstromverluste der Spule P_{AC} werden separiert. Dieser Vorgang wird für unterschiedlichste Parametereinstellungen – beispielsweise Schwankungen der magnetischen Aussteuerung, Schaltfrequenz, Ripplestrom, usw. – gemessen, und diese empirischen Daten aufgezeichnet. Mit Hilfe dieser empirischen Daten wird das Modell zur Berechnung der AC-Verluste erstellt:

$$P_{AC} = f(\Delta I, \text{freq}, DC, k1, k2)$$

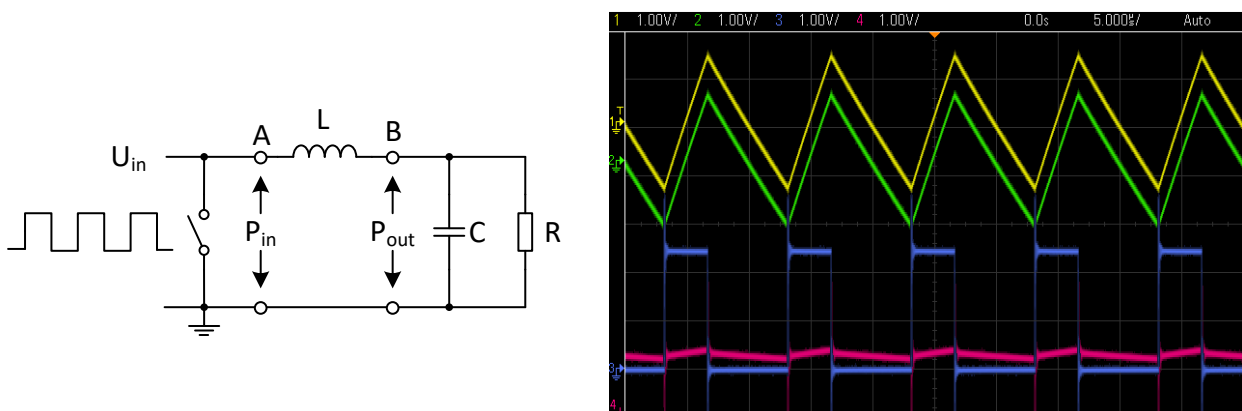


Abbildung 5: Aufbau des DC/DC Wändlers zur Verlustermittlung und zugehörige Oszilloskop-Aufnahmen

APPLICATION NOTE



Ermittlung der idealen Speicherinduktivität für energieeffiziente Anwendungen

Vorteile des Würth Elektronik AC Verlustmodells:

- Die empirischen Daten basieren auf einem DC/DC Wandler
- Genaue Ermittlung der Verluste für jedes gegebene Tastverhältnis
- Genau über einen weiten Frequenzbereich (10 kHz bis 10 MHz)
- Berücksichtigt auch kleinste Veränderungen des Kernmaterials und der Wicklungsstruktur
- Gültig für Bauteile, mit mehr als einem verwendeten Material
- Genaue Ermittlung der Verluste von Bauteilen mit Eisenpulver und Metalllegierungen
- Gültig für jede beliebige Kernbauform und Windungsstruktur
- Beinhaltet auch die AC-Wicklungsverluste

3.3. Leistungsfähigkeit des Würth Elektronik Modells

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. wurden über große Tastverhältnis- und Frequenzbereiche gemessen und mit theoretischen Modellen verglichen (Abbildung 6). In den nachfolgenden Diagrammen sind die mit der Steinmetz-Leistungsgleichung (Pst), Modifizierten Steinmetzgleichung (Pmse) und Generalisierten Steinmetzgleichung (Pgse) ermittelten Kernverluste dargestellt. REDEXPERT ist der Wechselstromverlust nach Berechnung mit dem AC-Verlustmodell von Würth Elektronik. Real ist der gemessene AC-Verlust.

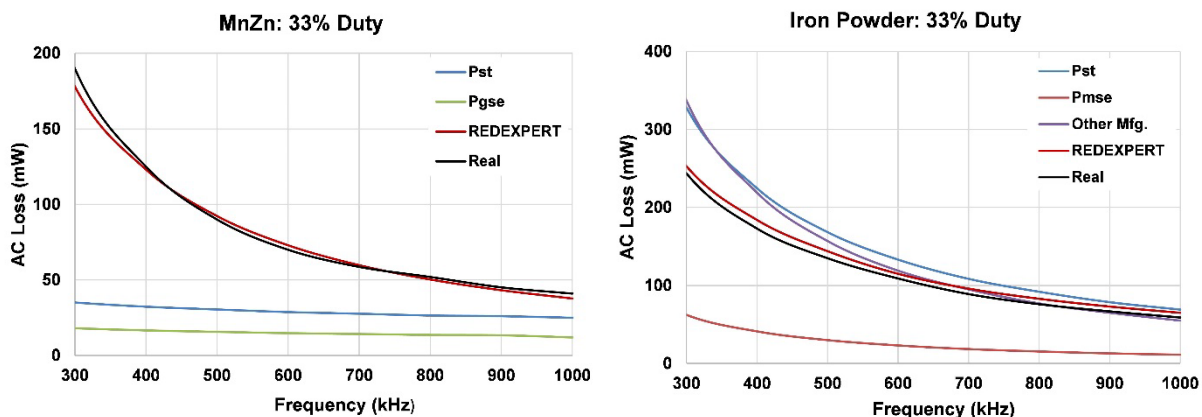


Abbildung 6: Induktivität aus MnZn sowie Eisenpulver bei 33 % DC

4. Verluste mit REDEXPERT ermitteln

REDEXPERT ist das neue Online Design Werkzeug von Würth Elektronik eiSos, mit dem unkompliziert eine für die jeweilige Anwendung geeignete Speicherdrossel ausgewählt werden kann. REDEXPERT ist ein einfach zu bedienendes und ein effektives Tool, um in kürzester Zeit Bauteile vergleichen und auswählen zu können. Zunächst gibt der Benutzer die Eingangs- und Ausgangsparameter der gewünschten Topologie ein. Dann berechnet REDEXPERT den benötigten Induktivitätswert und zeigt die passenden Induktivitäten an. Abbildung 7 zeigt eine Bildschirmaufnahme von REDEXPERT.

APPLICATION NOTE



Ermittlung der idealen Speicherinduktivität für energieeffiziente Anwendungen

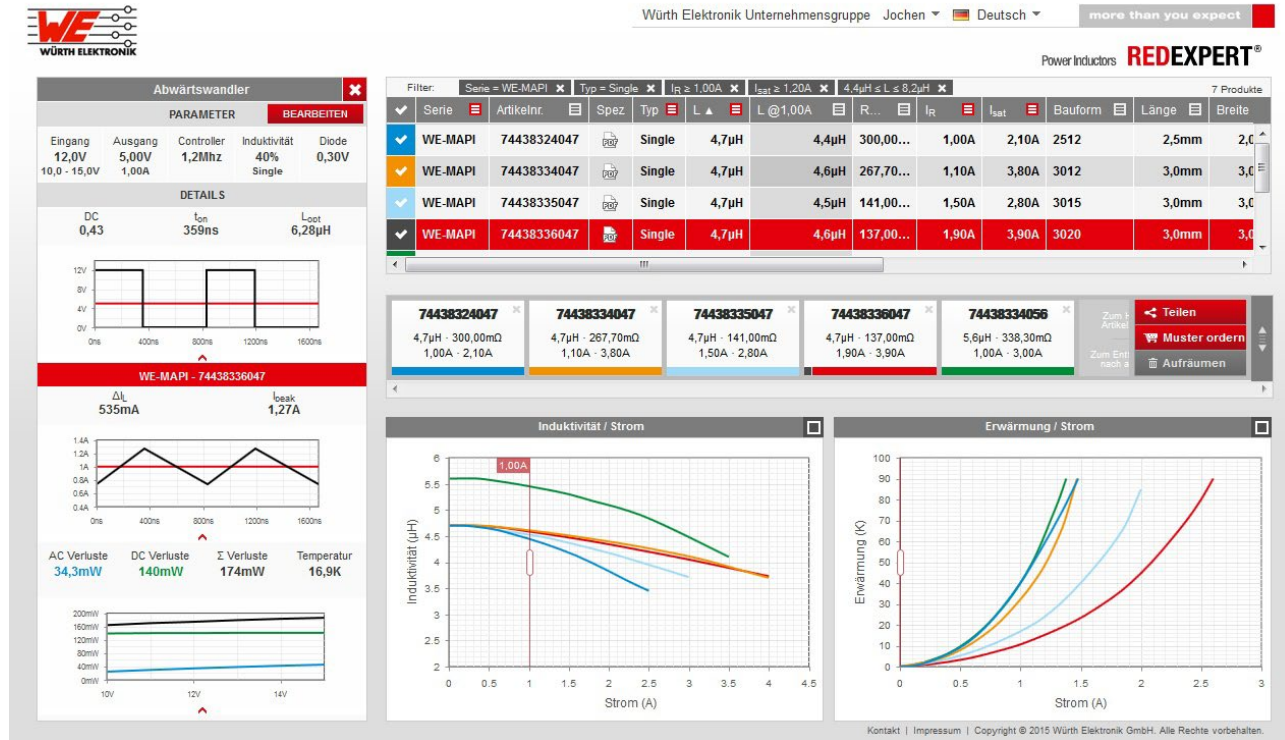


Abbildung 7: Simulation eines Tiefsetzstellers in REDEXPERT mit der WE-MAPI

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 integriert ist**. Aufgrund der genauen Berechnung der kompletten AC-Verluste eignet sich die Anwendung auch zur Temperaturabschätzung.

Derzeit unterstützt REDEXPERT drei Topologien, bei denen das Bauteil für die Anwendung ausgewählt werden kann: Aufwärts-, Abwärts- und SEPIC-Wandler. Die Verluste werden graphisch über den kompletten Eingangsspannungsbereich dargestellt, um auch die Extremszenarien zu betrachten. So kann bequem für die jeweilige Anwendung die energieeffizienteste Speicherdrossel im Handumdrehen ausgewählt werden.

Um die richtige Induktivität für einen Tiefsetzsteller zu ermitteln, gibt man in der Eingabemaske (Abbildung 8) den vorhandenen Eingangsspannungsbereich sowie Ausgangsspannung und -strom ein, dazu noch die Schaltfrequenz, die Diodenflussspannung und den angestrebten Ripplestrom der Induktivität. Mit einem Klick auf „Details anzeigen“ erhält man die passenden Speicherinduktivitäten inkl. deren erwartete Rippleströme und die Verluste in der Applikation.

APPLICATION NOTE



Ermittlung der idealen Speicherinduktivität für energieeffiziente Anwendungen

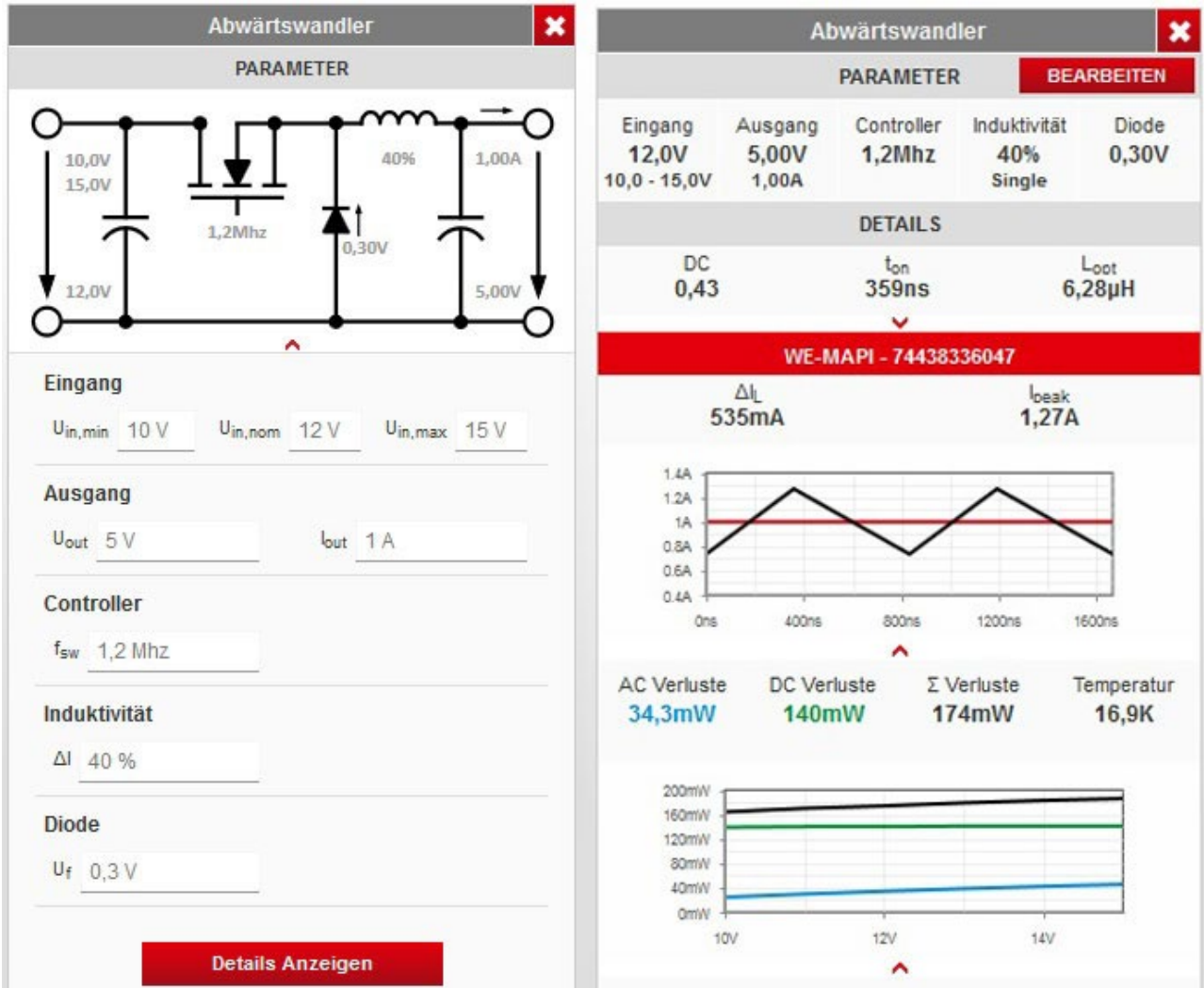


Abbildung 8: Den Tiefsetzsteller definieren und die Verluste der gewählten Induktivität

Zusätzlich gibt es einen manuellen Verlustrechner, welcher unabhängig von der Topologie die Verluste für Speicherdrosseln berechnet. Hierzu müssen lediglich die Frequenz, das Tastverhältnis sowie der Ripplestrom oder der Spannungsabfall eingegeben werden, und REDEXPERT erledigt den Rest. Praktisch ist, dass unterhalb der Eingabemaske die entsprechenden Eingaben sofort graphisch dargestellt werden.

REDEXPERT ist ein webbasiertes Tool, d. h., der Benutzer muss REDEXPERT weder herunterladen noch sich um die Aktualisierung kümmern. Registrierte Kunden kommen in den Genuss weiterer Vorteile, wie z.B. die **Ermittlung des Induktivitätswertes oder der Temperaturerhöhung der Induktivität bei jedem beliebigen Stromwert.**

APPLICATION NOTE



Ermittlung der idealen Speicherinduktivität für energieeffiziente Anwendungen

5. Zusammenfassung

Die WE-MAPI Speicherinduktivitäten bieten maximale Leistung auf kleinstem Raum. Mit dem innovativen Kernmaterial und dem durchdachten Design setzen sie neue Maßstäbe. Für energieeffiziente Schaltregler wählt man die WE-MAPI am besten mit REDEXPERT, dem neuen Online Designwerkzeug von Würth Elektronik aus. Hier ist das weltweit genaueste AC-Verlustmodell integriert, welches über weite Wertebereiche für die Parameter Frequenz, Ripplestrom und Tastverhältnis eine sehr hohe Genauigkeit wiedergibt.

APPLICATION NOTE



Ermittlung der idealen Speicherinduktivität für energieeffiziente Anwendungen

WICHTIGER HINWEIS

Der Anwendungshinweis basiert auf unserem aktuellen Wissens- und Erfahrungsstand, dient als allgemeine Information und ist keine Zusicherung der Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG zur Eignung des Produktes für Kundenanwendungen. Der Anwendungshinweis kann ohne Bekanntgabe verändert werden. Dieses Dokument und Teile hiervon dürfen nicht ohne schriftliche Genehmigung vervielfältigt oder kopiert werden. Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG und seine Partner- und Tochtergesellschaften (nachfolgend gemeinsam als „WE“ genannt) sind für eine anwendungsbezogene Unterstützung jeglicher Art nicht haftbar. Kunden sind berechtigt, die Unterstützung und Produktempfehlungen von WE für eigene Anwendungen und Entwürfe zu nutzen. Die Verantwortung für die Anwendbarkeit und die Verwendung von WE-Produkten in einem bestimmten Entwurf trägt in jedem Fall ausschließlich der Kunde. Aufgrund dieser Tatsache ist es Aufgabe des Kunden, erforderlichenfalls Untersuchungen anzustellen und zu entscheiden, ob das Gerät mit den in der Produktspezifikation beschriebenen spezifischen Produktmerkmalen für die jeweilige Kundenanwendung zulässig und geeignet ist oder nicht.

Die technischen Daten sind im aktuellen Datenblatt zum Produkt angegeben. Aus diesem Grund muss der Kunde die Datenblätter verwenden und wird ausdrücklich auf die Tatsache hingewiesen, dass er dafür Sorge zu tragen hat, die Datenblätter auf Aktualität zu prüfen. Die aktuellen Datenblätter können von www.we-online.com heruntergeladen werden. Der Kunde muss produktspezifische Anmerkungen und Warnhinweise strikt beachten. WE behält sich das Recht vor, an seinen Produkten und Dienstleistungen Korrekturen, Modifikationen, Erweiterungen, Verbesserungen und sonstige Änderungen vorzunehmen.

Lizenzen oder sonstige Rechte, gleich welcher Art, insbesondere an Patenten, Gebrauchsmustern, Marken, Urheber- oder sonstigen gewerblichen Schutzrechten werden hierdurch weder eingeräumt noch ergibt sich hieraus eine entsprechende Pflicht, derartige Rechte einzuräumen. Durch Veröffentlichung von Informationen zu Produkten oder Dienstleistungen Dritter gewährt WE weder eine Lizenz zur Verwendung solcher Produkte oder Dienstleistungen noch eine Garantie oder Billigung derselben.

Die Verwendung von WE-Produkten in sicherheitskritischen oder solchen Anwendungen, bei denen aufgrund eines Produktausfalls sich schwere Personenschäden oder Todesfällen ergeben können, sind unzulässig. Des Weiteren sind WE-Produkte für den Einsatz in Bereichen wie Militärtechnik, Luft- und Raumfahrt, Nuklearsteuerung, Marine, Verkehrswesen (Steuerung von Kfz, Zügen oder Schiffen), Verkehrssignalanlagen, Katastrophenschutz, Medizintechnik, öffentlichen Informationsnetzwerken usw. weder ausgelegt noch vorgesehen. Der Kunde muss WE über die Absicht eines solchen Einsatzes vor Beginn der Planungsphase (Design-In-Phase) informieren. Bei Kundenanwendungen, die ein Höchstmaß an Sicherheit erfordern und die bei Fehlfunktionen oder Ausfall eines elektronischen Bauteils Leib und Leben gefährden können, muss der Kunde sicherstellen, dass er über das erforderliche Fachwissen zu sicherheitstechnischen und rechtlichen Auswirkungen seiner Anwendungen verfügt. Der Kunde bestätigt und erklärt sich damit einverstanden, dass er ungeachtet aller anwendungsbezogenen Informationen und Unterstützung, die ihm durch WE gewährt wird, die Gesamtverantwortung für alle rechtlichen, gesetzlichen und sicherheitsbezogenen Anforderungen im Zusammenhang mit seinen Produkten und der Verwendung von WE-Produkten in solchen sicherheitskritischen Anwendungen trägt. Der Kunde hält WE schad- und klaglos bei allen Schadensansprüchen, die durch derartige sicherheitskritische Kundenanwendungen entstanden sind.

NÜTZLICHE LINKS

Application Notes:

<http://www.we-online.de/app-notes>

REDEXPERT Design Tool:

<http://www.we-online.de/redexpert>

Toolbox:

<http://www.we-online.de/toolbox>

Produkt Katalog:

<http://katalog.we-online.de/>

KONTAKTINFORMATIONEN

Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG

Max-Eyth-Str. 1, 74638 Waldenburg, Germany

Tel.: +49 (0) 7942 / 945 – 0

Email: appnotes@we-online.de

Web: <http://www.we-online.de>