

# Induktivitätsmessung an Leistungsdrosseln



## Ermittlung des Sättigungsverhaltens in Abhängigkeit von der Vormagnetisierung

Bei Leistungsdrosseln mit Gleichstromvormagnetisierung interessiert oft weniger die Anfangsinduktivität, sondern vielmehr die sich stromabhängig ändernde Induktivität im Betrieb in der realen Schaltung über den gesamten Arbeitsbereich bis in die Sättigung. Doch herkömmliche Kleinsignal-Messbrücken sind hierbei überfordert.

Von Hubert Kreis

Sofern es sich nicht um Luftspulen handelt, zeigen alle Leistungsinduktivitäten ein bestimmtes Sättigungsverhalten, d.h., die Induktivität nimmt bei steigendem Strom ab. Dies liegt an den Kernmaterialien, welche ab einer bestimmten Induktion  $B$  mehr oder minder stark an Permeabilität verlieren und sich dann im Extremfall wie Luft verhalten. Das Sättigungsverhalten einer Drossel kann beeinflusst werden durch die Wahl des Kernmaterials, durch die Kerngeometrie, durch die Windungszahl und durch den Luftspalt.

Allerdings ergeben sich oft Abweichungen zwischen der berechneten Induktivität bei einem bestimmten Strom (z.B. dem Nennstrom) und der realen Induktivität, da die Drosselgeometrie eine inhomogene Feldverteilung verursacht, die Datenblattangaben des Kernes oft unvollständig sind, sich Exemplarstreuungen der Kerne bemerkbar machen und darüber hinaus Fertigungstoleranzen bzw. Temperatureinflüsse auftreten. Bei der Entwicklung und der Qualitätsprüfung von Leistungsdrosseln muss deshalb das Sättigungsverhalten gemessen werden.

## Leistungsdrosseln in der Anwendung

Leistungsdrosseln werden für viele Anwendungen benötigt, z.B. als Glättungsdrosseln für getaktete Stromversorgungen, als Filterdrosseln für IGBT-Umrichter (Sinusfilter), als Kommutierungsdrosseln für netzgeführte Umrichter, als Glättungsdrosseln für Stromzwischenkreise und viele weitere Schaltungskonzepte.

Einer der Hauptanwendungsbereiche ist der als Glättungsdrossel für getaktete Stromversorgungen (Bild 1). Dabei ist der Spannungsverlauf an der Drossel rechteckförmig. In der Drossel ergibt sich ein Stromfluss, der einen Gleichanteil mit einem überlagerten „Strom-Ripple“ aufweist (Bild 2). Die Frequenz dieses überlagerten dreieckförmigen Stroms entspricht der Taktfrequenz der Applikation und kann von einigen 100 Hz bis einige MHz reichen.

Für den Entwickler der Schaltung ist die Anfangsinduktivität  $L_0$  meist von geringem Interesse. Für ihn ist die Induktivität beim höchsten auftretenden (Gleich-)Strom wesentlich wichtiger, da sie den überlagerten Strom-Ripple (und damit die Restwelligkeit

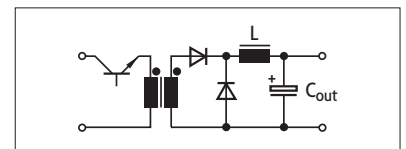


Bild 1. Typische Applikation einer Filterdrossel, z.B. in getakteten Stromversorgungen.

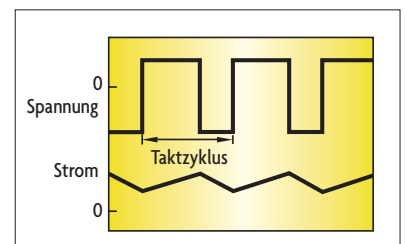


Bild 2. Typische Spannungs- und Stromverläufe an einer Filterdrossel.

der Stromversorgung) sowie den maximalen Strom durch die Leistungshalbleiter bestimmt. Würde die Glättungsdrossel etwa vor dem Erreichen des gewünschten maximalen Ausgangsstroms  $I_{out\ max}$  hart in die Sättigung gehen, würden die Leistungshalbleiter entweder beschädigt oder überhitzt, der Kondensator  $C_{out}$  könnte überlastet werden, und die Welligkeit am Ausgang würde stark zunehmen.

Bei den meisten anderen Schaltungstopologien und bei vielen anderen Anwendungsfällen für Leistungsdrosseln (z.B. Sinusfilter für IGBT-Umrichter) ist die Problematik prinzipiell gleich.

Mit einer üblichen Kleinsignal-Messbrücke kann nur die Anfangsinduktivität  $L_0$  gemessen werden, da die Mess-Ströme äußerst klein sind. Um das Sättigungsverhalten messen zu können, muss auch ein entsprechend hoher Strom durch die Drossel fließen. Für die folgenden Ausführungen ist es außerdem wichtig zu wissen, dass die Induktivität jeder Drossel frequenzabhängig ist.

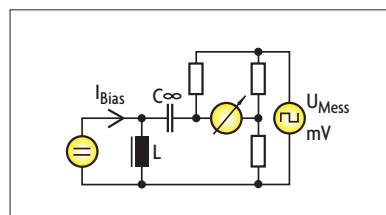
### ■ Messung mit dem Festfrequenzverfahren

Es gibt prinzipiell zwei verschiedene Messverfahren: das Festfrequenzverfahren und das di/dt-Verfahren. Beim Festfrequenzverfahren wird der Prüfling mit einem entsprechenden Gleichstrom aus einer Gleichstromquelle beaufschlagt. Dem wird eine sinusförmige Kleinsignal-Messspannung von z.B. 10 kHz überlagert und aus der Amplitude und der Phasenlage des gemessenen Stromes die Induktivität errechnet (Bild 3). Der Vorteil des Verfahrens ist, dass die Messfrequenz genau und reproduzierbar festgelegt ist. Nachteilig ist jedoch, dass die Messbedingungen mit den Anwendungsbedingungen wenig zu tun haben, da die Drossel dort nicht mit einem sinusförmigen Kleinspannungs-Signal fester Frequenz beaufschlagt wird, sondern mit einer rechteckförmigen Spannung, welche einen entsprechenden Gehalt an harmonischen Oberschwingungen mit einem Vielfachen der Taktfrequenz aufweist. Des Weiteren ist eine entsprechend leistungsfähige Gleichstromquelle notwendig, welche bei

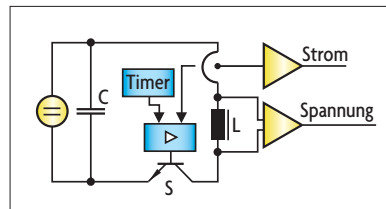
größeren Strömen (über 20 A) sehr teuer wird. Um eine Messkurve des Induktivitätsverlaufes über der Gleichstromvormagnetisierung zu erstellen, müssen sehr viele Einzelmessungen bei verschiedenen Strömen durchgeführt werden.

### ■ Messung mit dem di/dt-Verfahren

Bei diesem Verfahren wird der Prüfling mit einem rechteckförmigen Spannungsimpuls wie in der realen Applikation beaufschlagt. Im Prüfling stellt



! Bild 3. Prinzipschaltung des Messaufbaus im Festfrequenzverfahren: Der Prüfling wird in eine Messbrücke integriert und von einer Gleichstromquelle vormagnetisiert.  $C_\infty$  hält den Gleichanteil von der Messbrücke fern.



! Bild 4. Prinzipschaltung: Messaufbau nach dem di/dt-Verfahren. Der Strom wird nicht-galvanisch ausgekoppelt.

sich dann ein Stromverlauf ein, dessen Anstiegsgeschwindigkeit di/dt von der Induktivität und deren Sättigungsverhalten abhängt. Wenn der voreingestellte Maximalstrom erreicht ist, wird der Messimpuls wieder beendet (Bild 4).

Durch die Auswertung des Verlaufes der Anstiegsgeschwindigkeit di/dt des Mess-Stroms kann mit einer einzigen Messung eine komplette Induktivitätskurve für den Prüfling erstellt werden, die den Induktivitätsverlauf in Abhängigkeit von der Gleichstromvormagnetisierung darstellt. Wenn die Spannung des Messimpulses der Spannung entspricht, die in der realen Applikation am Prüfling anliegt, dann wird auch die Frequenzabhängigkeit

des Ergebnisses einer Festfrequenzmessung eliminiert. Ein weiterer Vorteil liegt in der impulsförmigen Messung, da die Stromquelle den Mess-Strom nicht dauerhaft liefern muss und deshalb durch eine entsprechende Kondensatorbank nachgebildet werden kann. Dies spart erheblich Kosten und Bauvolumen.

### Praktische Realisierung des di/dt-Verfahrens

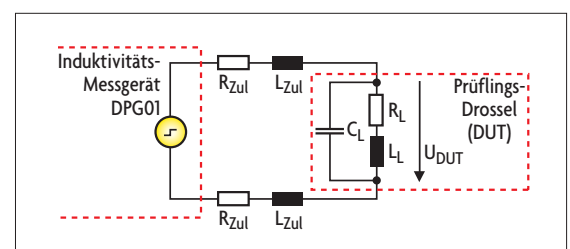
Bei der praktischen Umsetzung des di/dt-Verfahrens sind einige Punkte zu beachten. Bild 5 zeigt in diesem Zusammenhang die erweiterte Ersatzschaltung des Messaufbaus.

Da aufgrund der parasitären Spannungsabfälle auf den Zuleitungen die Spannung des Messimpulses am Prüfling nie konstant ist, muss die Spannung  $U_{DUT}$  direkt am Prüfling gemessen und in die Berechnung einbezogen werden. Der ohmsche Widerstand  $R_L$  ist ebenfalls zu berücksichtigen. Der Einfluss von  $C_L$  kann jedoch praktisch immer vernachlässigt werden. Es ergibt sich dann folgende Formel zur Berechnung der Induktivität  $L_L$ :

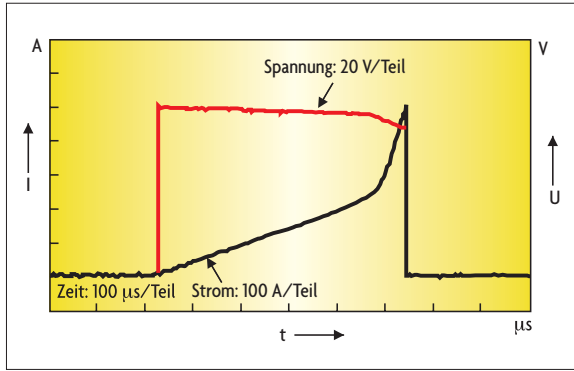
$$L_L(i) = [U_{DUT}(i) - R_L \times i] \times dt/di$$

### Die Signalerfassung

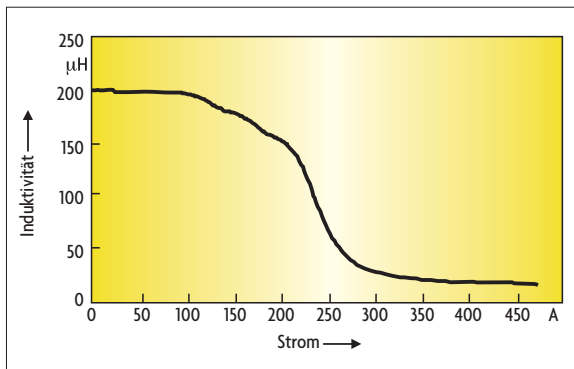
Da das di/dt-Verfahren mit einzelnen Messimpulsen arbeitet, müssen der Verlauf des Stroms durch den Prüfling und der Verlauf der Spannung über dem Prüfling aufgezeichnet und gespeichert werden, damit sich deren Kurvenform anschließend auswerten lässt. Für eine gute Genauigkeit der Induktivitätsberechnung muss die Auflösung der A/D-Umsetzer 12 bit oder besser bei gleichzeitig sehr hoher Wandlungsrate (mehr als jeweils 50 Ms/s) sein.



! Bild 5. Erweiterte Ersatzschaltung der Messanordnung beim di/dt-Verfahren.



**Bild 6.** Gemessene Strom- und Spannungsverläufe an einer PFC-Drossel mit amorphem Schnittbandkern und Luftspalt ( $L_N = 190 \mu\text{H}$ ,  $I_N = 135 \text{ A}$  (effektiv)). Diese Drossel geht bei etwa 200 bis 250 A hart in die Sättigung.



**Bild 7.** Sättigungsabhängige Induktivitätskurve der Drossel nach Bild 6.

**Bild 6** zeigt ein Oszillogramm des Mess-Stroms und der Spannung am Prüfling. Es handelt sich um eine PFC-Drossel mit amorphem Schnittbandkern und Luftspalt zur aktiven Leistungsfaktorkorrektur. Die angegebene Nenninduktivität  $L_N$  beträgt  $190 \mu\text{H}$ , der Nennstrom  $I_N$  ist  $135 \text{ A}$  (effektiv). Die Spannung des Messimpulses beträgt in diesem Beispiel etwa  $100 \text{ V}$ . Bei Erreichen eines Mess-Stroms von  $500 \text{ A}$  wird der Messimpuls wieder beendet. Anhand der Anstiegsgeschwindigkeit des Mess-Stroms lässt sich auf den ersten Blick erkennen, dass diese Drossel bei etwa  $200$  bis  $250 \text{ A}$  hart in die Sättigung geht. Für eine genauere Aussage bzw. die Erstellung einer Induktivitätskurve ist jedoch eine numerische Auswertung erforderlich.

### Die Signalauswertung

Die Signalauswertung, d.h. die Berechnung der Induktivitätskurve, erfolgt gemäß obiger Gleichung. Die

Schrittweite für das  $\Delta i$  bzw.  $\Delta t$  muss jedoch sorgfältig gewählt werden. Bei einer zu geringen Schrittweite ergeben bereits kleine Digitalisierungsfehler stark schwankende Induktivitätskurven. Bei einer zu großen Schrittweite werden plötzliche Sättigungsercheinungen nicht korrekt wiedergegeben. Es ist daher eine dynamische Schrittweitensteuerung notwendig, welche die Schrittweite in Abhängigkeit von  $di/dt$  automatisch anpasst.

### ■ Messungen in der Praxis

Da bislang Induktivitätsmessgeräte nach dem  $di/dt$ -Messverfahren nicht im Markt sind, wurde der „Power Choke Tester DPG10“ entwickelt (siehe Aufmacherfoto; Hersteller: [www.ed-k.de](http://www.ed-k.de)). Das Gerät arbeitet nach dem  $di/dt$ -Messverfahren und verfügt über drei Strombereiche, mit denen Mess-Ströme von etwa  $0,05$  bis  $1000 \text{ A}$  generierbar sind. Damit ist auch das Sättigungsverhalten sehr großer Induktivitäten messbar.

Die Spannung des Messimpulses kann von  $10$  bis  $400 \text{ V}$  eingestellt werden. So lässt sich jede Induktivität mit einer Mess-Spannung „versorgen“, wie sie auch in der realen Anwendung anliegt (z.B. hat eine Glättungsdrossel im Netzumrichter Ausgang rund  $400 \text{ V}$ , eine Glättungsdrossel im 5-V-Ausgang eines AC/DC-Wandlers rund  $20 \text{ V}$ ). Zusätzlich kann auch die Dauer des Messimpulses vor-eingestellt werden, was z.B. bei der Messung von Spannungs-Zeit-Flächen sinnvoll ist.

Die maximal mögliche Impulsennergie ist durch die interne Kondensatorbatterie, welche den Mess-Strom lie-

fert, beschränkt. Sie beträgt bei maximaler Mess-Spannung bis zu  $800 \text{ J}$ . Dies ist auch für sehr große Leistungsdrosseln leicht ausreichend. Vor jeder Induktivitätsmessung wird zudem der ohmsche Widerstand automatisch gemessen und angezeigt.

Die Bedienung des Messgeräts und die Anzeige der Ergebnisse erfolgt per PC; das Messprotokoll enthält den Induktivitätsverlauf in Abhängigkeit vom Strom als Diagramm und in tabellarischer Form.

**Bild 7** zeigt den Induktivitätsverlauf der PFC-Drossel aus Bild 6. Diese Drossel weist beim Scheitelwert des Nennstroms von  $135 \text{ A} \times 1,41 = 190 \text{ A}$  eine Induktivität von  $156 \mu\text{H}$  auf. Der reale Spitzenstrom in der Applikation ist jedoch aufgrund des überlagerten Strom-Ripples nochmals um etwa  $30 \text{ A}$  höher. Die Induktivität beträgt dann nur noch  $127 \mu\text{H}$  und ist damit schon  $33 \%$  unter dem angegebenen Nennwert von  $190 \mu\text{H}$ . Für den Schaltungsentwickler bedeutet dies, dass der Spitzenstrom in seiner Applikation größer ist als kalkuliert und somit evtl. die Auslegung der Leistungshalbleiter nicht mehr ausreicht, so dass die Netzrückwirkungen und die Verluste ansteigen. Aus Entwickler-Sicht ist die Drossel mit diesem Sättigungsverhalten nicht tragbar. *ha*



**Dipl.-Ing. Hubert Kreis**

ist in Schwäbisch Gmünd geboren und studierte Elektrotechnik an der TU Stuttgart. Seit 1994 war er bei verschiedenen Firmen in der Entwicklung von Schaltnetzteilen, elektrischen Antriebssystemen für schwere Fahrzeuge und Leistungselektronik für Luftfahrtgeräte tätig. 2002 gründete er die Firma ed-k, welche sich neben kundenspezifischen Entwicklungen auf Induktivitätsmessgeräte nach dem  $di/dt$ -Verfahren spezialisiert hat.

[H.Kreis@ed-k.de](mailto:H.Kreis@ed-k.de)