

Induktivitätsmessung von Leistungsdrosseln

Ermittlung des Sättigungsverhaltens in Abhängigkeit von der Vormagnetisierung

Bei Leistungsdrosseln mit Gleichstromvormagnetisierung interessiert oft weniger die Anfangsinduktivität, sondern die Induktivität beim Einsatz in der realen Schaltung über den gesamten Arbeitsbereich. Diese Induktivität ist nicht konstant, sondern hängt vom momentan fließenden Strom ab. Mit herkömmlichen Kleinsignal-Meßbrücken können diese „Sättigungseffekte“ nicht erfaßt werden.

Von Hubert Kreis

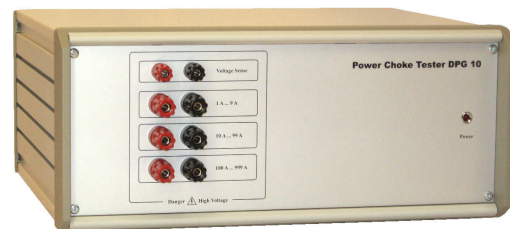
Sofern es sich nicht um Luftspulen handelt, besitzen alle Leistungsinduktivitäten ein bestimmtes Sättigungsverhalten, d.h. die Induktivität nimmt bei steigendem Strom ab. Dies liegt an den Kernmaterialien, welche ab einer bestimmten Induktion B mehr oder minder stark an Permeabilität verlieren und sich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

- die Wahl des Kernmaterials,
- die Kerngeometrie,
- die Windungszahlen
- und 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 ungenau oder unvollständig sind
- Exemplarsteuungen der Kerne vorhanden sind
- Fertigungstoleranzen auftreten
- Temperatureinflüsse vorhanden sind.

Bei der Entwicklung und der Qualitätsprüfung von Leistungsinduktivitäten kommt man deshalb nicht umher, das Sättigungsverhalten zu messen.



Leistungsdrosseln in der Anwendung

Leistungsdrosseln werden für viele Anwendungsfälle benötigt, wie z.B.

- Glättungsdrosseln für getaktete Stromversorgungen
- Filterdrosseln für IGBT-Umrichter (Sinusfilter)
- Kommutierungsdrosseln für netzgeführte Umrichter
- Glättungsdrosseln für Stromzwischenkreise
- und viele andere.

Einer der Hauptanwendungsbereiche sind Glättungsdrosseln für getaktete Stromversorgungen. Eine typische Applikation ist in Bild 1 zu sehen.

Der Spannungsverlauf an der Drossel ist rechteckförmig. In der Drossel ergibt sich ein Stromfluß, der einen Gleichanteil mit einem überlagerten Stromripple aufweist (siehe Bild 2). Die Frequenz des Stromripple entspricht der Taktfrequenz der Applikation und kann von einigen 100Hz bis einige Megaherz 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

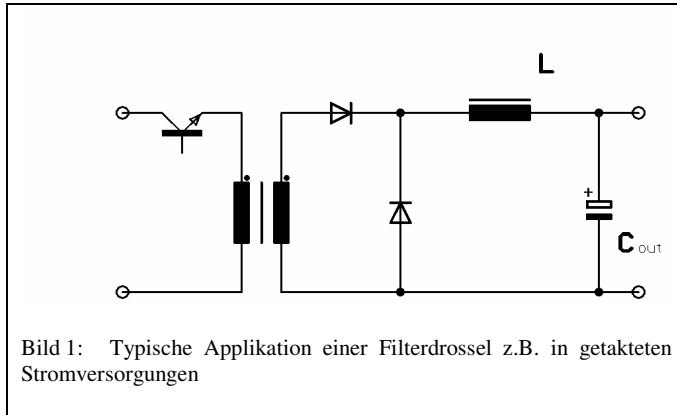


Bild 1: Typische Applikation einer Filterdrossel z.B. in getakteten Stromversorgungen

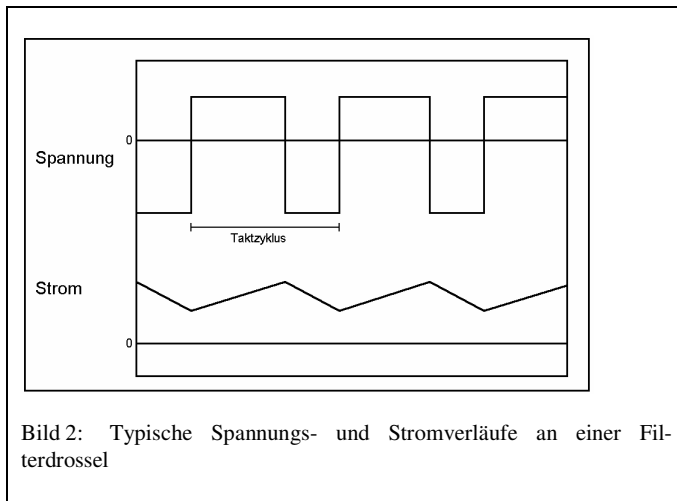


Bild 2: Typische Spannungs- und Stromverläufe an einer Filterdrossel

überlagerten Stromripple (und damit die Restwelligkeit der Stromversorgung) sowie den maximalen Strom durch die Leistungshalbleiter bestimmt. Würde die Glättungsdrossel etwa vor dem Erreichen des gewünschten maximalen Ausgangsstromes $I_{out\ max}$ hart in 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 Leistungs-drosseln (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 Meßströme äußerst klein sind. Um das Sättigungsverhalten messen zu können, muß 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.

Verschiedene Meßverfahren

Es gibt prinzipiell zwei verschiedene Ansätze zum Meßverfahren: das Festfrequenzverfahren und das di/dt-Verfahren.

a) Das Festfrequenzverfahren:

Der Prüfling wird mit einem entsprechenden Gleichstrom aus einer Gleichstromquelle beaufschlagt.

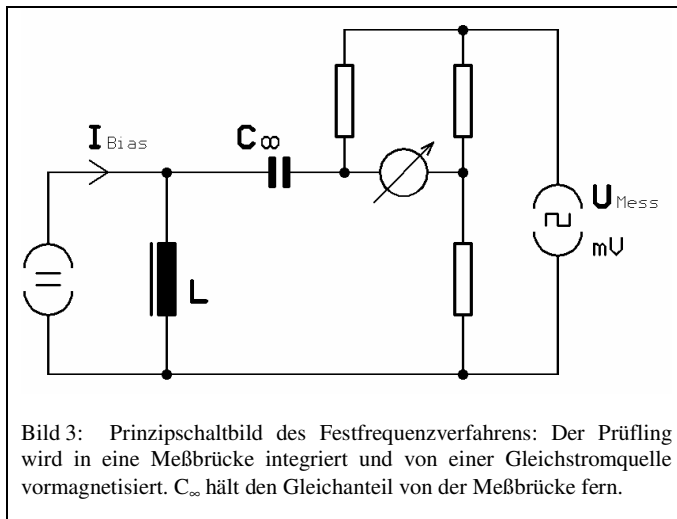


Bild 3: Prinzipschaltbild des Festfrequenzverfahrens: Der Prüfling wird in eine Meßbrücke integriert und von einer Gleichstromquelle vormagnetisiert. C_{∞} hält den Gleichanteil von der Meßbrücke fern.

Dem wird eine sinusförmige Kleinsignal-Meßspannung von z.B. 10kHz 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.

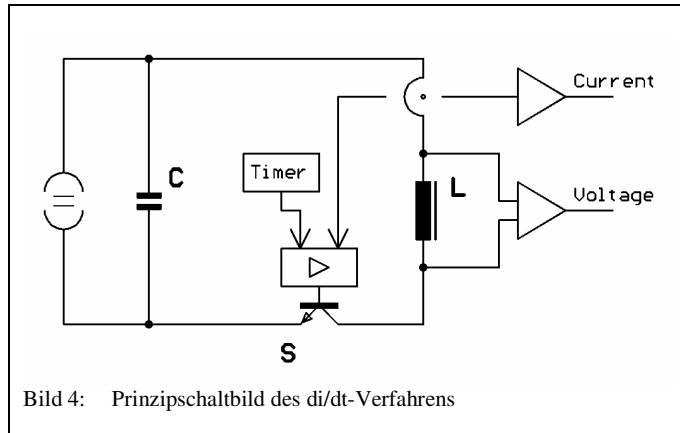
Nachteilig ist jedoch, daß die Meßbedingungen mit den Anwendungsbedingungen wenig zu tun haben, da die Drossel dort nicht mit einem sinusförmigen Kleinspannungssignal fester Frequenz beaufschlagt wird, sondern mit einer rechteckförmigen Spannung, welche einen entsprechenden Gehalt an

harmonischen Oberschwingungen mit einem Vielfachen der Taktfrequenz aufweist. Zudem ergeben sich bei der Kleinsignalmessung durch die nichtlineare Hysteresekennlinie verschiedener Kernmaterialien z.T. grobe Meßfehler.

Desweiteren ist eine entsprechend leistungsfähige Gleichstromquelle notwendig, welche bei größeren Strömen (>20A) sehr teuer wird. Um eine Meßkurve des Induktivitätsverlaufes über der Gleichstromvormagnetisierung zu erstellen, müssen sehr viele Einzelmessungen bei verschiedenen Strömen durchgeführt werden.

b) Das di/dt-Verfahren:

Bei diesem Verfahren wird der Prüfling mit einem rechteckförmigen Spannungsimpuls wie in der



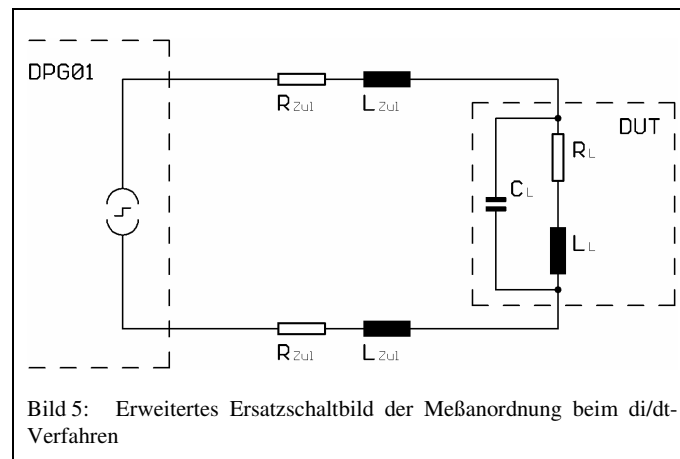
realen Applikation beaufschlagt. Im Prüfling stellt sich dann ein Stromverlauf ein, dessen Anstiegsgeschwindigkeit di/dt von der Induktivität und deren Sättigungsverhalten abhängt. Wenn der voreingestellte Maximalstrom erreicht ist, wird der Meßimpuls wieder beendet (Bild 4).

Durch die Auswertung des Verlaufes der Anstiegsgeschwindigkeit di/dt des Meßstromes 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 Meßstrom 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 müssen noch einige weitere Punkte beachtet werden. Bild 5 zeigt das erweiterte Ersatzschaltbild der Meßanordnung.

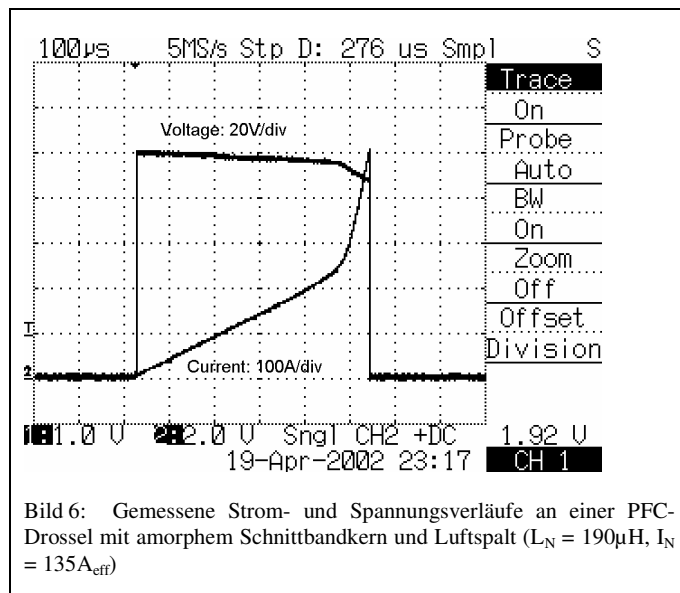


Da aufgrund der parasitären Spannungsabfälle auf den Zuleitungen die Spannung des Meßimpulses am Prüfling nie konstant ist, muß die Spannung U_{DUT} direkt am Prüfling gemessen und in die Berechnung mit einbezogen werden. Der ohmsche Widerstand R_L muß ebenfalls berücksichtigt werden. Der Einfluß von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

$$L_L(i) = [U_{DUT}(i) - R_L * i] * dt/di. \quad (1)$$

Signalersfassung

Da das di/dt-Verfahren mit einzelnen Meßimpulsen arbeitet, muß der Verlauf des Stromes durch den Prüfling und der Spannung über dem Prüfling aufgezeichnet und gespeichert werden, damit deren Kurvenform anschließend ausgewertet werden kann. Für eine gute Genauigkeit der Induktivitätsberechnung muß die Auflösung 12 bit oder besser sein.



In Bild 6 ist ein Oszillogramm des Meßstromes und der Spannung über dem Prüfling zu sehen. Es handelt sich um eine PFC-Drossel mit amorphem Schnittbandkern und Luftspalt zur aktiven Leistungsfaktorkorrektur. Die angegebene Nenninduktivität beträgt $L_N = 190\mu\text{H}$, der Nennstrom ist $I_N = 135\text{A}_{\text{eff}}$. Die Spannung des Meßimpulses beträgt in diesem Beispiel etwa 100V. Bei Erreichen eines Meßstromes von 500A wird der Meßimpuls wieder beendet. Anhand der Anstiegsgeschwindigkeit des Meßstromes läßt sich auf den ersten Blick erkennen, daß diese Drossel bei etwa 200 bis 250A hart in die Sättigung geht. Für eine genauere Aussage bzw. die

Erstellung einer Induktivitätskurve ist jedoch eine numerische Auswertung erforderlich.

Erstellung einer Induktivitätskurve ist jedoch eine numerische Auswertung erforderlich.

Signalwertung

Die Signalauswertung, d.h. die Berechnung der Induktivitätskurve erfolgt gemäß Gleichung (1). Die Schrittweite für das Δi bzw. Δt muß jedoch sorgfältig gewählt werden. Bei einer zu kleinen Schrittweite ergeben bereits kleine Digitalisierungsfehler stark schwankende Induktivitätskurven. Bei einer zu großen Schrittweite werden plötzliche Sättigungserscheinungen nicht korrekt wiedergegeben. Es empfiehlt sich daher eine dynamische Schrittweitensteuerung, welche die Schrittweite in Abhängigkeit von di/dt und d^2i/dt^2 automatisch anpaßt.

Das Induktivitäts-Meßgerät DPG10

Da bislang Induktivitätsmeßgeräte nach dem di/dt-Meßverfahren nicht angeboten werden, hat die Firma ed-k aus Krailling (bei München) das Induktivitätsmeßgerät *Power Choke Tester DPG10* entwickelt. Es arbeitet nach dem di/dt-Meßverfahren und besitzt 3 Strombereiche (1 ... 9A, 10 ... 99A und 100 ... 999A). Damit ist auch das Sättigungsverhalten sehr großer Induktivitäten meßbar.

Die Spannung des Meßimpulses kann von 10V bis 400V eingestellt werden. So kann jede Induktivität mit einer Meßspannung gemessen werden, wie sie auch in der realen Anwendung der Induktivität anliegt (z.B. Glättungsdrossel für Netzumrichter Ausgang => 400V, Glättungsdrossel für 5V-Ausgang eines AC/DC-Wandlers => 20V).

Zusätzlich kann auch die Dauer des Meßimpulses von 1 μs bis 70 ms voreingestellt werden, was z.B. bei der Messung von Spannungs-Zeit-Flächen sinnvoll ist.

Die maximal mögliche Impulsenergie ist durch die interne Kondensatorbatterie, welche den Meßstrom liefert, beschränkt und beträgt bei maximaler Meßspannung bis zu 800J. Dies ist auch für sehr große Leistungsdrosseln leicht ausreichend. Vor jeder Induktivitätsmessung wird zudem der ohmsche Widerstand automatisch gemessen und angezeigt.

Die Bedienung des Meßgerätes und die Anzeige der Meßergebnisse erfolgt über einen PC. Eine einfache und übersichtliche grafische Benutzeroberfläche ermöglicht eine intuitive Bedienung. Die Möglichkeit zur Abspeicherung der Einstellungen erleichtert Reihenmessungen in der

Qualitätsprüfung. Das Meßprotokoll enthält den Induktivitätsverlauf in Abhängigkeit vom Strom als

Diagramm und in tabellarischer Form. Die Ansicht ist umschaltbar, sodaß auch die Induktivität in Abhängigkeit von der Spannungs-Zeit-Fläche dargestellt werden kann.

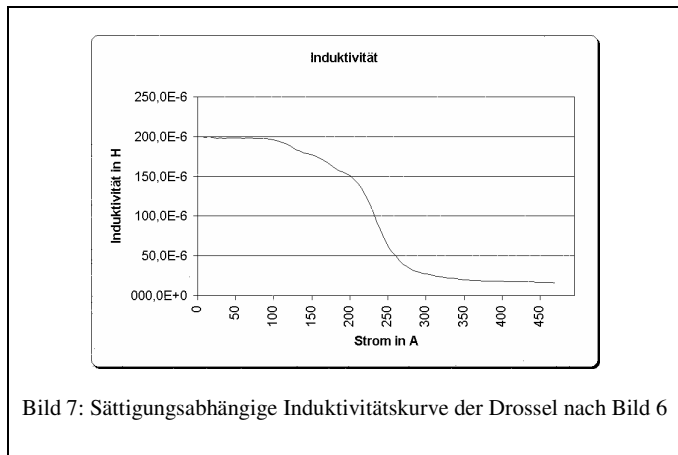


Bild 7: Sättigungsabhängige Induktivitätskurve der Drossel nach Bild 6

Bild 7 zeigt den Induktivitätsverlauf der PFC-Drossel aus Bild 6. Diese Drossel weist beim Scheitelwert des Nennstromes von $135\text{A} \cdot 1,41 = 190\text{A}$ eine Induktivität von $156\mu\text{H}$ auf. Der reale Spitzenstrom in der Applikation ist jedoch aufgrund des überlagerten schaltfrequenten Stromripples nochmals um etwa 30A höher. Die

Induktivität beträgt dann nur noch $127\mu\text{H}$ und ist damit schon 33% unter dem angegebenen Nennwert. 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 und die Netzrückwirkungen und die Verluste ansteigen. Aus seiner Sicht ist die Drossel mit diesem Sättigungsverhalten nicht tragbar.