

# Induktivitätsmessung bei 50Hz-Netzdröseln

## Ermittlung der Induktivität und des Sättigungsverhaltens mit dem Impulsinduktivitätsmeßgerät DPG10 im Vergleich zur Messung mit Netzspannung und Netzstrom

Die Induktivitätsmessung von Leistungsdröseln für den Netzbetrieb kann im Wesentlichen auf 3 verschiedene Arten durchgeführt werden:

- Elektronische Induktivitätsmeßbrücken (Kleinsignal-Festfrequenzmeßverfahren)
- Messung mit Netzströmen und Netzspannungen
- di/dt-Impulsmeßverfahren (Meßprinzip des DPG10)

Im Folgenden sollen die technischen Hintergründe der einzelnen Meßprinzipien anschaulich dargestellt und durch die Erläuterung der theoretischen Zusammenhänge untermauert werden. Es wird gezeigt, daß nur das di/dt-Meßverfahren des DPG10 eine richtige und vollständige Aussage über die Induktivität erlaubt.

Von Hubert Kreis

Die Induktivitätsmessung von Netzdröseln erfolgt bisher häufig mit Netzströmen und Netzspannungen, da gebräuchliche elektronische Induktivitätsmeßgeräte dazu recht ungeeignet sind. Dies liegt am Meßverfahren dieser Meßgeräte.

### a) Meßverfahren von elektronischen Kleinsignal-Induktivitätsmeßbrücken

Das Meßverfahren von elektronischen Induktivitätsmeßbrücken beruht meist darauf, den Prüfling in eine Brückenschaltung zu legen und die Brückenspannung auszuwerten (siehe

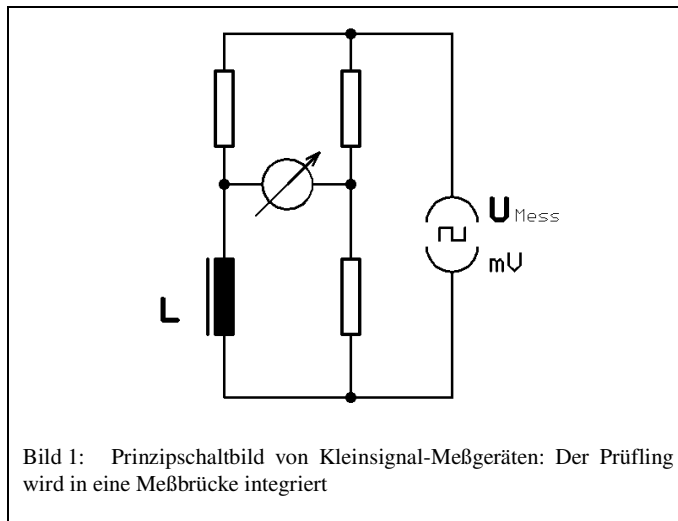


Bild 1). In jedem Fall wird der Prüfling mit einer Kleinsignal-Wechselspannung fester Frequenz im mV-Bereich und mit Strömen im mA-Bereich beaufschlagt. Dadurch wird das Kernmaterial nur sehr gering angesteuert, d.h. die Magnetisierungskurve des Kernmaterials wird nur bis zu sehr kleinen Feldstärken durchlaufen.

In Bild 2 sind beispielhaft die Magnetisierungskurven von verschiedenen eisen-basierten Kernmaterialien dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, daß die Steigung der Magnetisierungs-

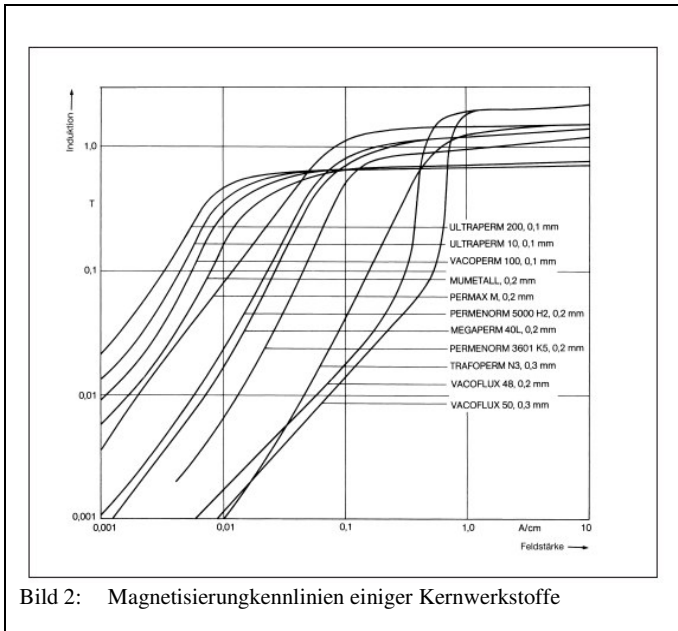
kurven keinesfalls konstant ist, sondern typischerweise zunächst flacher verläuft, dann wesentlich steiler wird und dann bei zunehmender Sättigung des Kernes nahezu waagrecht wird. Diese Steigung ist gemäß Definitionsgleichung (1)

$$\mu_r = B / (\mu_0 * H) \tag{1}$$

das Maß für  $\mu_r$ .

Die Induktivität von Luftspaltdrosseln berechnet sich gemäß Gleichung (2) zu

$$L = w^2 * \mu_0 * A / (l_E / \mu_r + l_L) \quad (2)$$



Aus dieser Gleichung ist ersichtlich, daß der Einfluß von  $\mu_r$  nur dann vernachlässigbar ist, wenn  $\mu_r$  groß ist. Bei üblichen weichmagnetischen Kernwerkstoffen ist die Anfangspermeabilität  $\mu_{ra}$  jedoch bis zu 40 mal geringer als die maximale Permeabilität. Die Anfangspermeabilität von Hyperm 1 beträgt z.B. nur 500. Dies führt dazu, daß gebräuchliche Kleinsignal-Induktivitätsmeßgeräte wesentlich kleinere Induktivitätswerte anzeigen als erwartet.

Beispiel 1: Luftspaltdrossel mit Schnittbandkern SU39,  $I_{Nenn} = 4A$ . Der Hersteller gibt die Nenninduktivität mit 1,9mH an. Ein Klein-

signal-Induktivitätsmeßgerät liefert hier eine Induktivität von 1,12mH. Je nach Höhe der Meßsignal-Amplitude können unterschiedliche Gerätetypen auch unterschiedliche Meßergebnisse liefern, da die Magnetisierungskennlinie unterschiedlich weit durchlaufen wird.

Fazit:

Für Netzdrosseln mit Eisenkernen sind Kleinsignal-Induktivitätsmeßgeräte nicht geeignet!

**b) Messung mit Netzströmen und Netzspannungen**

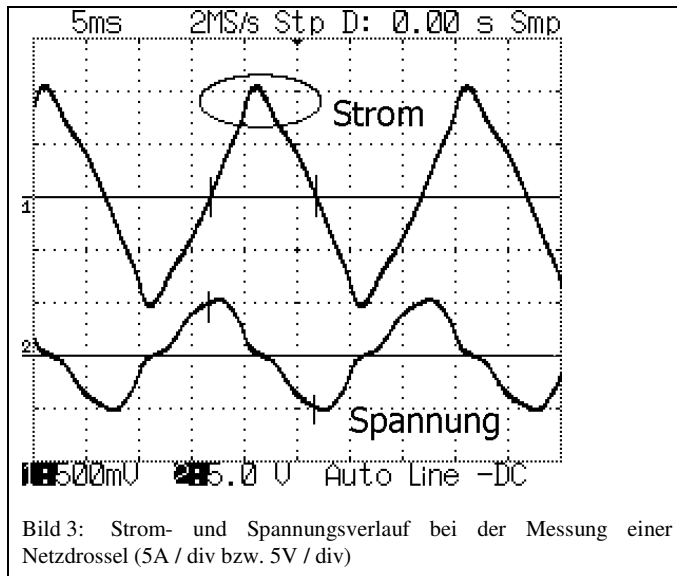
Bei der Messung von Netzdrosseln mit Netzströmen und Netzspannungen wird der Prüfling in der Regel mit Nennstrom und Nennspannung (meist 50Hz) beaufschlagt. Die Effektivwerte des Stromes und der Spannung werden gemessen. Nach der allgemeinen Wechselstromlehre berechnet sich die Induktivität dann zu

$$L = U / \omega * I \quad (\text{ bzw. } L = U / [2 * \pi * 50\text{Hz} * I]) \quad (3)$$

Das grundsätzliche Problem hierbei ist, daß durch das *extrem nichtlineare Verhalten der Kernwerkstoffe keine sinusförmigen Spannungen und Ströme* vorhanden sind. Dies gilt ganz besonders für eisenbasierte Kernwerkstoffe. Beaufschlagt man die Netzdrossel mit sinusförmigen Strömen, ergibt sich eine nicht-sinusförmige Spannung am Prüfling. Umgekehrt ergeben sich nicht-sinusförmige Ströme, wenn man eine sinusförmige Spannung anlegt.

In der Praxis ergeben sich bei dieser Meßmethode weder sinusförmige Ströme noch sinusförmige Spannungen, wenn die Speisung nicht über einen elektronisch geregelten Verstärker erfolgt. Die gemessenen Größen weisen erhebliche Oberwellenanteile auf. Wird durch eine niederimpedante Speisung versucht, die Spannung möglichst sinusförmig einzuprägen, werden die Verzerrungen des Stromes noch größer. Umgekehrt werden die Verzerrungen der Spannung größer, wenn man sinusförmige Ströme einprägt.

In Bild 3 ist dies für die Drossel aus Beispiel 1 zu sehen. Sie wurde mit einem Effektivstrom von 6,4A und einer Effektivspannung von 3,32V bei 50 Hz beaufschlagt. Der Stromverlauf ist eher dreieckförmig. Auch der Spannungsverlauf ist verzerrt.



Den Grund dafür kann man sich leicht anschaulich vergegenwärtigen. In den Stromnulldurchgängen weist die Drossel wegen der flachen Magnetisierungskennlinie (d.h. kleines  $\mu_r$ ) eine geringere Induktivität auf (siehe Gleichung (2)). Dies führt zu flacheren Spannungsverläufen bzw. steilerem Stromanstieg. Im steilen Bereich der Magnetisierungskennlinie (d.h. hohes  $\mu_r$ ) bei mittleren Strömen folgen Strom und Spannung äußerst grob einer Sinuskurve. Bei höheren Strömen (die Kuppen der Stromkurve) wird  $\mu_r$  zunehmend

kleiner, da man in den rechten Teil der Magnetisierungskennlinie kommt. Es ergeben sich wieder höhere Stromanstiegsgeschwindigkeiten wegen der kleineren Induktivität der Drossel. Dies führt dazu, daß die normalerweise runden Sinuskuppen spitzig werden. Im Extremfall können sich sogar sehr steile, nadelförmige Impulse auf den Kuppen befinden. Bei solchen prinzipiell immer mehr oder weniger verzerrten Kurven ist nun eine Effektivwertmessung von Spannung und Strom und die anschließende Berechnung der Induktivität nach Gleichung (3) aus 2 Gründen falsch:

- Die Gleichung (3) stammt aus der allgemeinen Wechselstromlehre. Diese ist jedoch nur für sinusförmige Größen gültig. Bei verzerrten Meßgrößen mit Oberwellen (Fourieranalyse) müßte Gleichung (3) auf jede einzelne Oberwelle angewandt werden. Dies ist offensichtlich wenig hilfreich. Die Induktivitätsberechnung nur anhand der 50Hz-Grundwelle liefert ein falsches Ergebnis.
- Bei der Effektivwertmessung wird definitionsgemäß die Meßgröße quadratisch bewertet und über eine Periode integriert. Die Effektivwertmessung von verzerrten, oberwellenhaltigen Meßgrößen liefert daher ein Ergebnis, das auch bei gleicher Grundwelle je nach Art der Verzerrung sehr unterschiedlich sein kann.

Für die Drossel aus Beispiel 1 ergibt diese Meßmethode eine Induktivität von 1,65mH ( $L = 3,32V / 2 * \pi * 50Hz * 6,4A$ ). Dieses Ergebnis ist in diesem Fall zwar besser als die Messung mit der Kleinsignal-Meßbrücke nach Meßverfahren a), welche 1,12mH ergab. Von der physikalischen Realität ist dieses Ergebnis jedoch weit entfernt, wie im Abschnitt c) gezeigt wird.

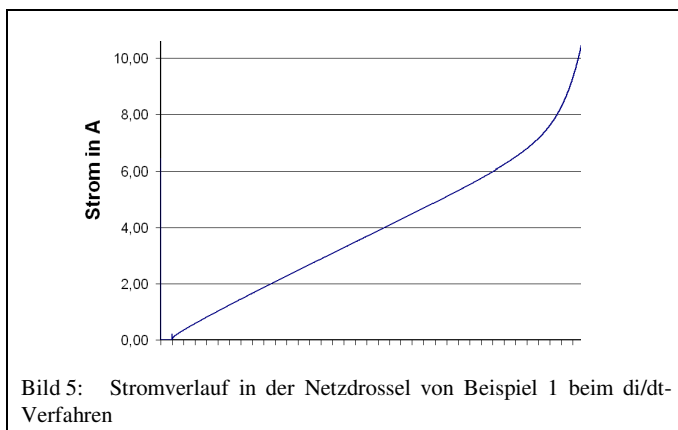
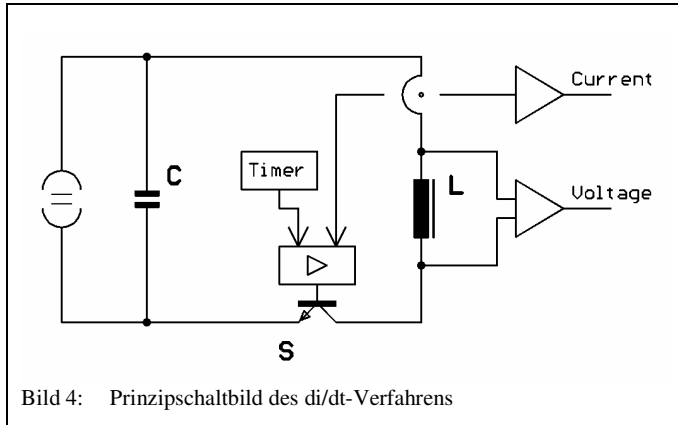
Fazit:

Die Messung von Netzdrosseln mit Nennwechselstrom und Nennwechselspannung ist aufgrund des extrem nichtlinearen Verhaltens von Eisenkernen (auch mit Luftspalt) prinzipiell wenig geeignet.

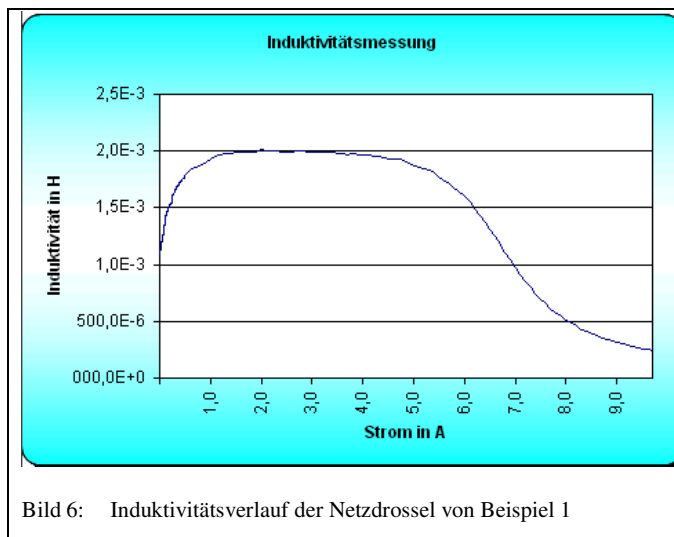
Dieses Verfahren hatte seine Berechtigung in der Vergangenheit nur, weil keine Meßgeräte mit einem besseren Meßverfahren erhältlich waren.

### c) di/dt-Impulsmeßverfahren (Meßprinzip des DPG10)

Wie im Abschnitt a) und b) gezeigt wurde, ist die Induktivität einer Eisenkerndrossel auch mit Luftspalt bei einem bestimmten Netzstrom nicht konstant. Die Magnetisierung der Drossel verläuft entsprechend der Magnetisierungskennlinie auf Hysteresekurven und entsprechend ändert sich die Induktivität auch bei konstantem Netzstrom laufend. Das Großsignal-di/dt-Meßprinzip des DPG10 kann dieses Verhalten exakt darstellen.



In Bild 6 ist diese Meßkurve für die Drossel aus Beispiel 1 zu sehen. Die Anfangsinduktivität bei 0A Strom beträgt ca. 1,1mH, was



Bei diesem Meßverfahren wird die Drossel mit einem rechteckförmigen Spannungsimpuls beaufschlagt. In der Drossel stellt sich dann ein Stromverlauf ein, dessen Anstiegsgeschwindigkeit  $di/dt$  von der Induktivität 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 (Bild 5) kann mit einer einzigen Messung eine *komplette Induktivitätskurve* für den Prüfling erstellt werden, die den Induktivitätsverlauf über die gesamte Magnetisierungskennlinie des Kernwerkstoffes darstellt. Der Einfluß der extrem nichtlinearen Magnetisierungskennlinie bzw. des extrem schwankenden  $\mu_r$  auf die Induktivität wird immer exakt dargestellt, unabhängig von der Größe des Luftspaltes der Netzdrossel.

ungefähr dem Meßergebnis mit Meßverfahren a) entspricht. Mit zunehmendem Strom steigt jedoch  $\mu_r$  stark an bzw. die Magnetisierungskurve wird wesentlich steiler. Durch den Luftspalt wird dieser Einfluß zwar geringer (siehe Gleichung (2)), ist aber noch immer stark vorhanden. Die Induktivität der Drossel steigt auf 2mH an, was fast das Doppelte der Anfangsinduktivität ist. Noch vor dem Erreichen des Spitzen-Nennstromes von  $4A \cdot \sqrt{2} = 5,7A$  fällt die Induktivität wieder um 15% ab. Bei Überströmen sinkt die Induktivität schließlich auf weniger als 10% des Maximalwertes ab.

Dieser Induktivitätsverlauf ist bei allen Eisenkerndrosseln prinzipiell ähnlich und auch für alle Bauleistungen gültig.

Wie im Abschnitt b) erläutert wurde, kann dieses Verhalten von Eisenkerndrosseln nicht mit der Messung mit Netzströmen und Netzspannungen ermittelt werden. Die Ermittlung einer

Induktivitätskurve durch wiederholte Messung mit verschiedenen Netzströmen würde andere, mehr oder weniger falsche Meßergebnisse liefern!

So ergab die Messung in Abschnitt b) eine Induktivität von 1,65mH bei einem Effektivstrom von 6,4A für die Drossel aus Beispiel 1. Beim dabei auftretenden Spitzenstrom von ca. 10,3A beträgt die reale Induktivität nach Bild 6 jedoch nur noch ca. 0,2mH !!!

Fazit:

Bei Eisenkerndrosseln (auch mit Luftspalt) liefert nur das di/dt-Meßverfahren des DPG10 richtige Ergebnisse.

Weder eine Messung mit elektronischen Kleinsignal-Meßbrücken noch eine Messung mit Netzströmen und Netzspannungen kann das Verhalten von Eisenkerndrosseln richtig wiedergeben.