

Rogowskispule

OV-ABEND B08 05/2017

DIPL.-ING (FH) BERNHARD GEBERT, DL1BG

Inhalt

Funktionsprinzip und Anwendung

Berechnung, Optimierung

Der Verstärker

Beispiel: Hochlineare IM- und Leistungsmessung

Beispiel: Mantelstrommessung

Funktionsprinzip und Anwendung

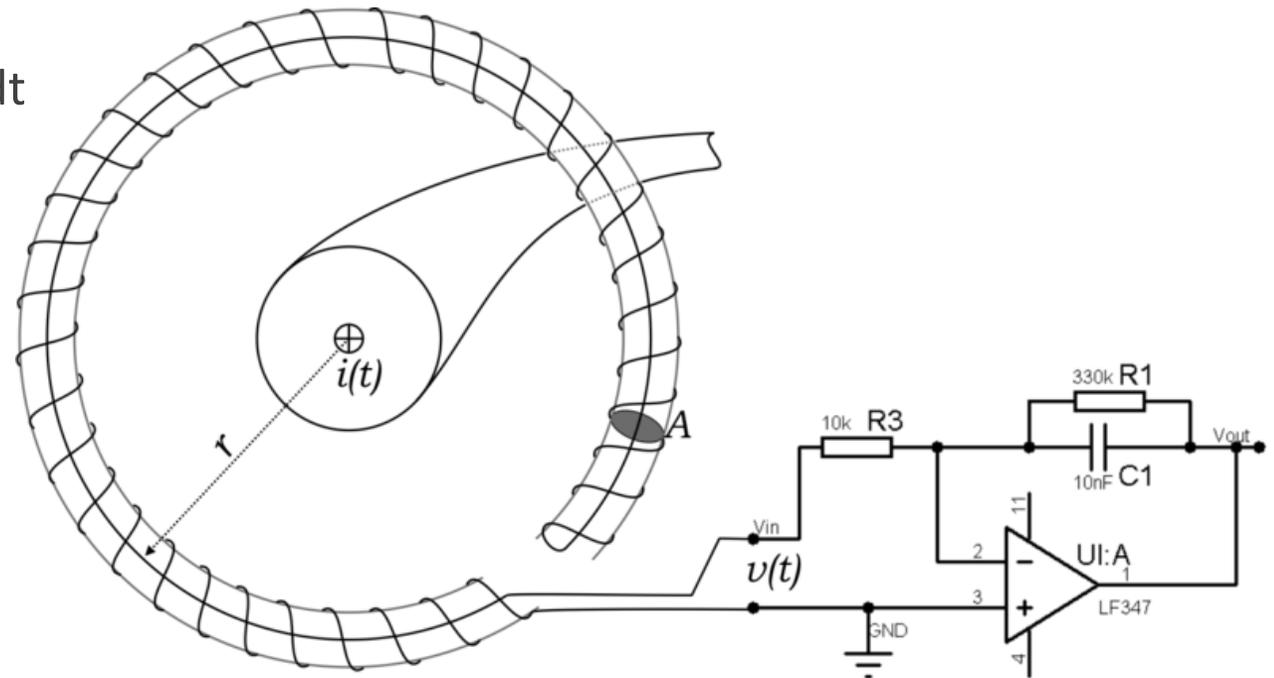
Funktionsprinzip und Anwendung

Grundlagen

Ein Stromdurchflossene Leiter erzeugt ein um seine Symmetrieachse drehendes Magnetfeld.

Die lange (Luft-)Zylinderspule erzeugt eine Induktionsspannung, die proportional zu di/dt ist.

Ein nachgeschalteter Integrator erzeugt eine zu $i(t)$ proportionale Spannung.



Funktionsprinzip und Anwendung

Wieso (nicht) Rogowskispulen anstelle von Stromwandlern

Rogowskispulen haben keinen (elektrisch relevanten) Kern und zeigen somit keinerlei Sättigungseffekte. Die Linearität ist unschlagbar.

Die Herstellung ist einfacher und kostengünstiger als die von Stromwandlern, insbesondere bei der Entflechtung auf Leiterplatten.

Der nichtinvasive Einbau in vorhandene Stromkreise ist sehr einfach möglich.

Da die Spule fast leistungslos arbeitet, ist der Einfluss des Messsystems auf die Leitung viel geringer als bei Stromwandlern.

Eine Messung von DC ist nicht möglich.

Bei sehr großen Frequenzbereichen (z. B. Faktor 10k) wird die Auswerteelektronik aufwändig.

Funktionsprinzip und Anwendung

Typische Anwendungen

Elektronische Stromzähler

Schutzschaltungen gegen Überstrom auf Leiterplatten bei schnellen Transienten.

Messmittel bei schwer vorhersagbaren Stromspitzen.

Teilentladungs- und Kurzschluss erfassung auf Energieversorgungsleitungen.

DL1BG: IM- und Leistungsmessung an Endstufen über den Stromverlauf (μA bis A an 50 Ohm).

Berechnung, Optimierung

Berechnung, Optimierung

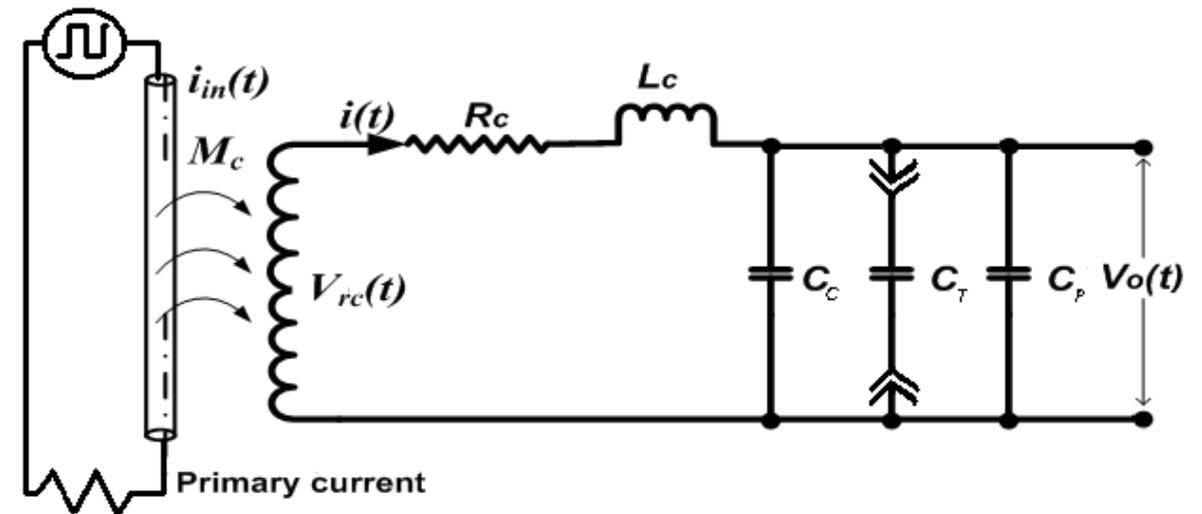
Ersatzschaltbild

Die Hauptinduktivität M erzeugt das eigentliche Messsignal nach dem Induktionsgesetz.

Der Wicklungswiderstand der Spule ist dazu in Reihe geschaltet.

Die Streuinduktivität der Spule ist ebenfalls in Reihe geschaltet und bildet zusammen mit dem Wicklungs- und Abschlusswiderstand einen LC-Tiefpass.

Parallel zum Ausgang wirken die Kapazitäten von Wicklung, Anschlusskabel und evtl. die des passiven Integrators.



Berechnung, Optimierung

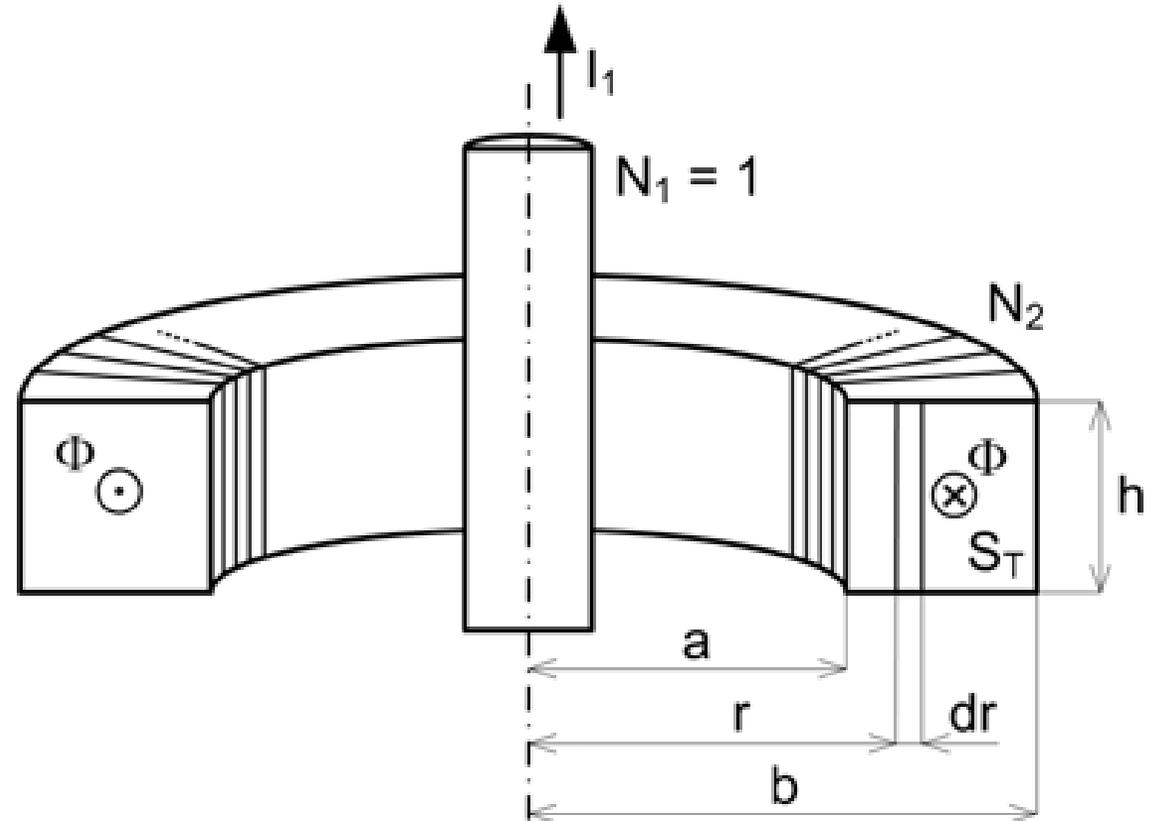
Berechnung

Hauptinduktivität $M = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot N^2 \cdot h \cdot \ln\left(\frac{b}{a}\right)$

Streuinduktivität $L = M \cdot N$

Ausgangsspannung $U = -M \frac{dI}{dt}$

Dämpfungswiderstand
Auf leicht überkritische Dämpfung auslegen
und im Versuch optimieren



Quelle: Hlavacek "The Rogowski Coil Design Software"

Berechnung, Optimierung

Optimierung für HF

Minimiere den Abstand zwischen Spule und Leiter.

- Sonst weniger Ausgangssignal und größerer Einfluss von externen Feldern.

Halte die Kabel zwischen Spule und Verstärker so kurz wie möglich und verdrillt.

- Jedes pF reduziert die Bandbreite, thermisches Rauschen und Störeinstrahlung nehmen zu.

Speziell bei PCB-Spulen: weiche nicht zu sehr von der Rechteckform ab.

- Das Verhältnis von Spulenquerschnitt zu Streuinduktivität wird sonst schlechter.

Der Leiterquerschnitt der Spule ist wenig relevant.

Der Spulenquerschnitt geht linear in das Ausgangssignal ein, die Windungszahl quadratisch.

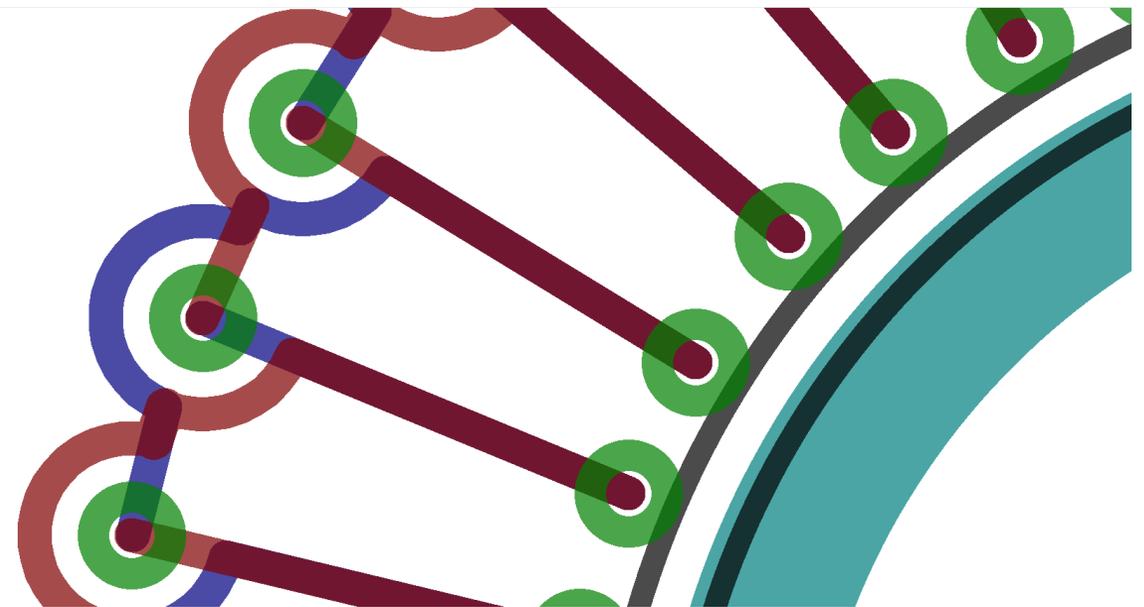
Berechnung, Optimierung

Beispiel PCB-Spule

Die Spule ist auf einer zweilagigen Platine
invers bifillar entflochten mit einer Fläche von
(1,6 x 3) mm² und 2x20 Windungen.

Man beachte die Leiterbahnführung.

Diese und zwei weitere Rogowskispulen
werden zur Ansicht verteilt.



Der Verstärker

Der Verstärker

Integrator: Aktiv, passiv, geteilt

Ohne Integrator liefert die Rogowskispule eine zu $di(t)/dt$ proportionale Ausgangsspannung. Selbst bei sinusförmigen Signalen macht das Probleme, weil die Übertragungsfunktion frequenzabhängig ist.

Bei hochfrequenten Signalen bietet sich ein einfaches RC-Glied zur Integration, da der durch Leckströme entstehende Messfehler vernachlässigbar bleibt.

Bei niederfrequenten Signalen wird mit einem OPV integriert, dieser muss allerdings rund die 100-Fache Bandbreite des Messsignals haben.

Ein „Split“ Integrator hat am Eingang ein RC-Glied und später einen aktiven Integrator mit derselben Grenzfrequenz.

Der Verstärker

Bandbreite

Die Bandbreite der Messschaltung ist nach unten hin begrenzt durch die Grenzfrequenz des passiven RC-Integrators.

Nach oben hin begrenzt das LC-Glied bestehend aus der Streuinduktivität der Spule und dem Last- oder Dämpfungswiderstand den Frequenzgang.

Der Verstärker

Verstärkung des Ausgangssignals

Impedanzwandlung

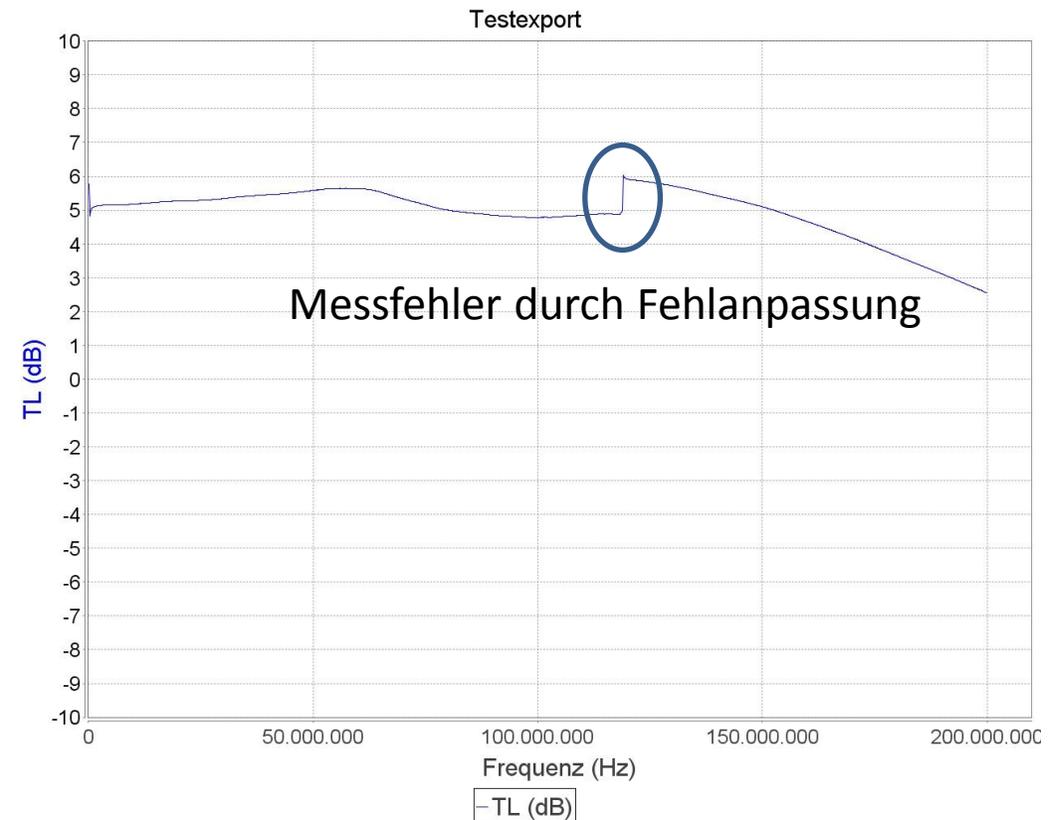
Die Eingangsimpedanz (incl. Kapazitiver Blindwiderstand) des Verstärkers muss so große sein, dass die Spule nicht übermäßig belastet wird, typisch einige Kilo-Ohm.

Spannungsverstärkung

Ein großer Verstärkungsfaktor vereinfacht die Auslegung der Spule, verschlechtert aber das Rauschverhalten.

Integration des Spulensignals

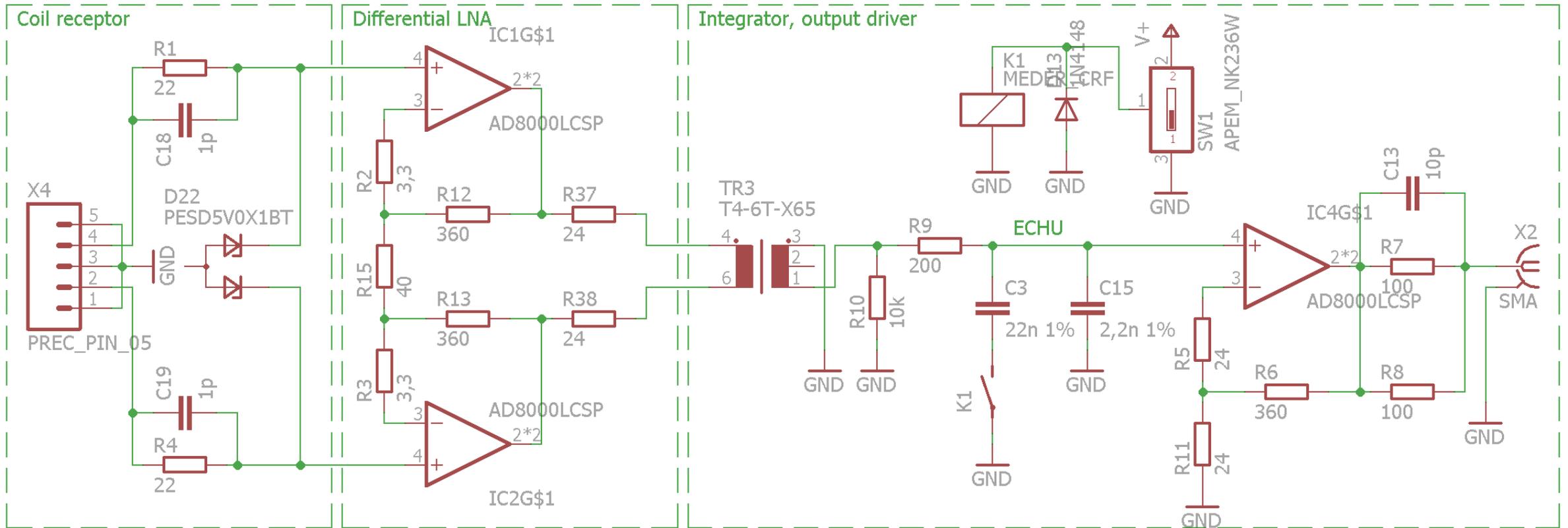
An geeigneter Stelle im Verstärker muss die aktive oder passive Integralbildung des Messsignals erfolgen.



Durchlasskennlinie des nachfolgend beschriebenen Verstärkers ohne Integrator bei 1 k Ω in und 50 Ω out, 27 dB Dämpfung eingebaut.

Der Verstärker

Vorschlag für einen kompletten HF-Verstärker



Quelle: DL1BG

Hochlineare IM- und Leistungsmessung

Hochlineare IM- und Leistungsmessung

Die Rogowskispule als einfacher HF-Messwandler

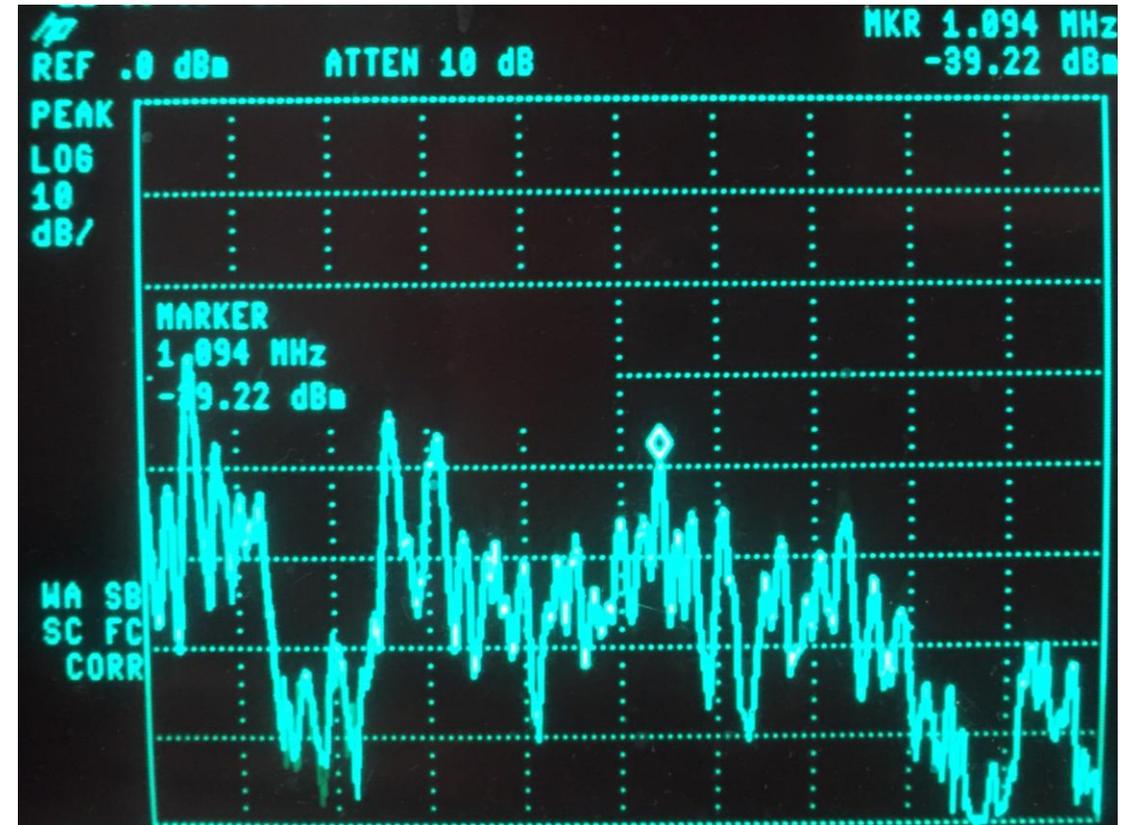
Wie misst man die IM-Produkte eines HF-Verstärkers mit mehreren kW, wenn man keine Dummyload (mit Monitorausgang) hat?

Ein Hochspannungstastkopf war nicht breitbandig genug, die Elektronik der verwendeten Stromzange hatte zu viel Offset im Kleinleistungsbereich.

Wie misst man den Stromverlauf am Beinchen eines HF-Transistors?

Welcher Stromwandler arbeitet über mehrere Dekaden an Leistung fast perfekt linear?

-> Die Rogowskispule 😊



Mantelstrommessung

Mantelstrommessung

Beispielrechnung für „RG213“ Rogowskispule

2x20 Windungen (1,5 x 3) mm², 12 mm Innendurchmesser

-> Hauptinduktivität 26 nH, Streuinduktivität 513 nH pro Wicklung

-> Errechneter idealer Dämpfungswiderstand 220 Ohm

Dämpfungswiderstand ausgelegt auf maximal benötigte 3 dB Bandbreite 310 MHz -> 100 Ω

Ausgangssignal der Spule bei 1 mA / 100 kHz: 1,3 μV

Damit bestimmt das Eigenrauschen von 1,1 μV / 20 MHz (angenommene Bandbreitenbegrenzung im Oszilloskop) die minimale Auflösung.

Bei 1 mV pro mA Skalierung wird eine Verstärkung von ~ 80 benötigt.

Auflösung ca 50 μW oder -63 dB bei 100 W Sendeleistung.

...Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit...

Fragen?