



# Stromversorgungs-Netznachbildungen

## Theoretische Grundlagen der Impedanzmessung

Dipl.-Ing.(FH) Rolf Heine

### 1. Stromversorgungs-Netznachbildungen gem. CISPR 16-1-2 und EN 55016-1-2

Dieses Papier beschreibt die Grundlagen für die Bestimmung der Impedanz von Netznachbildungen, die für die Messung von leitungsföhrten Funkstörspannungen eingesetzt werden. Grundlage dieses Papiers ist die Europäische Norm EN 55016-1-2, die auf die international gültige Norm IEC/CISPR 16-1-2 (*Radio interference measurements and statistical methods*) referenziert. EN 55016-1-2 (entspr. CISPR 16-1-2) kennt drei Arten von Stromversorgungs-Netznachbildungen:

Typ	Nachbildwiderstand	Frequenzbereich (MHz)	Empfohlene max. Stromstärke (A)
1	$50 \Omega / (50 \mu\text{H} + 5 \Omega)$	0,009 – 0,15 (30)	25
2	$50 \Omega / 50 \mu\text{H}$	0,15 – 30	100
3	$50 \Omega / (5 \mu\text{H} + 1 \Omega)$	0,15 – 30 (108)	400

Werte in Klammern beziehen sich auf weitere Anwendungen gem. CISPR mit erweitertem Frequenzbereich.

Angaben in diesem Beitrag beziehen sich auf eine Netznachbildung vom Typ 1, sofern nicht anders angegeben.

#### 1.1 Berechnung von Betrag und Phasenwinkel einer idealisierten Netznachbildung vom CISPR Typ 1

Die idealen Werte für Betrag und Phasenwinkel gibt EN 55016-1-2 in Tabellenform vor. Anhand einer Netznachbildung vom Typ 1 wird die Herleitung gezeigt. Die Netznachbildung vom Typ 1 dient im weiteren exemplarisch als Vorlage zur Erläuterung der grundsätzlichen Vorgehensweise bei der Untersuchung der Impedanz einer Netznachbildung. Induktivitäten sind als ideal angenommen.

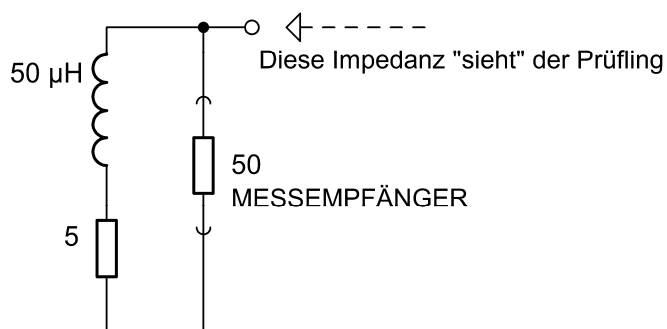


Bild 1: Idealisierte Schaltung einer Netznachbildung  $Z = 50 \Omega // (50 \mu\text{H} + 5 \Omega)$

Die komplexe Impedanz ( $Z$ ) der Schaltung aus Bild 1 berechnet sich wie folgt (Herleitung):

Die Impedanz der Netznachbildung ist gegeben durch:  $Z = (R_2 + j\omega L) \parallel R_1$

zur weiteren Berechnung umgestellt:

$$Z = \frac{R_1(R_2 + j\omega L)}{R_1 + R_2 + j\omega L}$$



Nenner konjugiert komplex erweitert:

$$Z = \frac{(R_1 R_2 + j\omega L R_1)(R_1 + R_2 - j\omega L)}{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L)^2}$$

Aus dieser Gleichung lassen sich Realteil (R) und Imaginärteil (X) von Z bestimmen:

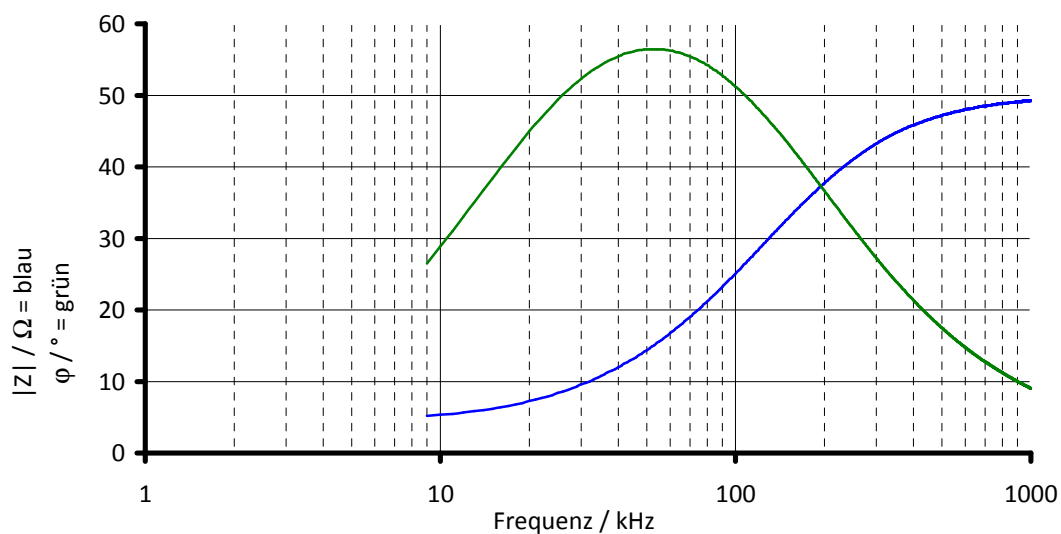
$$R = \frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2) + R_1 (\omega L)^2}{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L)^2} \quad ; \quad X = \frac{\omega L R_1^2}{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L)^2}$$

Netznachbildung Typ 1 wie in Bild 1:  $R_1 = 50 \Omega$ ,  $R_2 = 5 \Omega$ ,  $L = 50 \mu\text{H}$ ,  $\omega = 2\pi f$

Frequenzabhängiger Betrag  $|Z|$  und zugehöriger Phasenwinkel  $\varphi$  ermitteln sich daraus wie folgt:

$$\boxed{|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad ; \quad \varphi = \arctan \frac{X}{R}}$$

Die errechneten, idealen Kurven (hier noch ohne zulässige Toleranzen) zeigt *Bild 2*:



**Bild 2:** Betrag  $|Z|$  und Phasenwinkel  $\varphi$ , errechnet für eine Netznachbildung vom Typ 1:  $Z = 50 \Omega \parallel (50 \mu\text{H} + 5 \Omega)$   
Der Übersichtlichkeit halber beschränkt sich die Berechnung auf den Frequenzbereich bis 1 MHz.

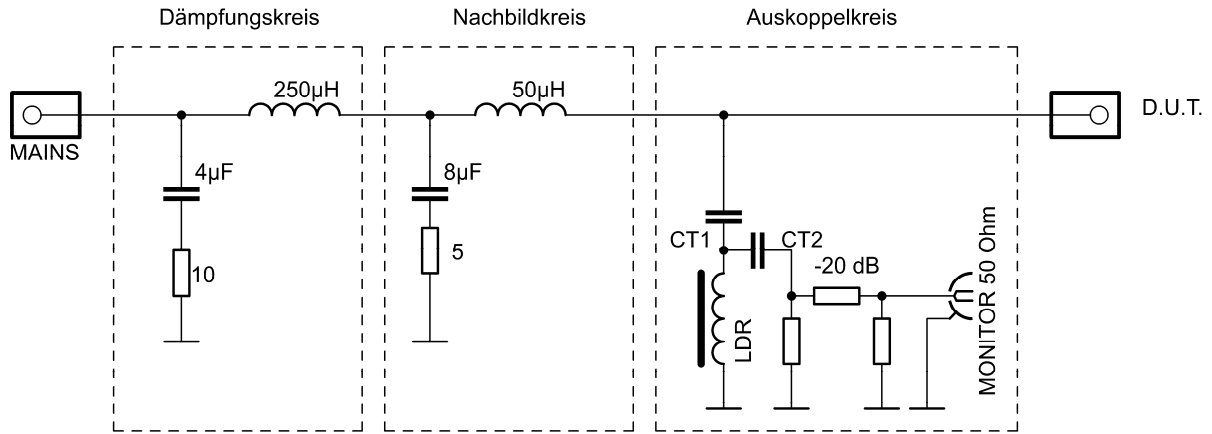
## 1.2 Ideale und reale Netznachbildung

Eine reale Netznachbildung weicht in ihrem Aufbau von der idealen ab. Zahlreiche schaltungstechnische Ergänzungen machen die Netznachbildung für ihre Aufgaben erst brauchbar. Die wesentlichen Aufgaben einer Netznachbildung sind:

- genormte Nachbildung der Impedanz einer Stromversorgung;
- impedanzrichtiger Abschluss des Messempfängers (Rückflusdämpfung > 20dB);
- Impedanztrennung der Stromversorgung und des Prüflingskreises (Dämpfung > 40dB typ.);
- Auskopplung der leitungsgeführten Funkstörspannung an den Messempfänger.

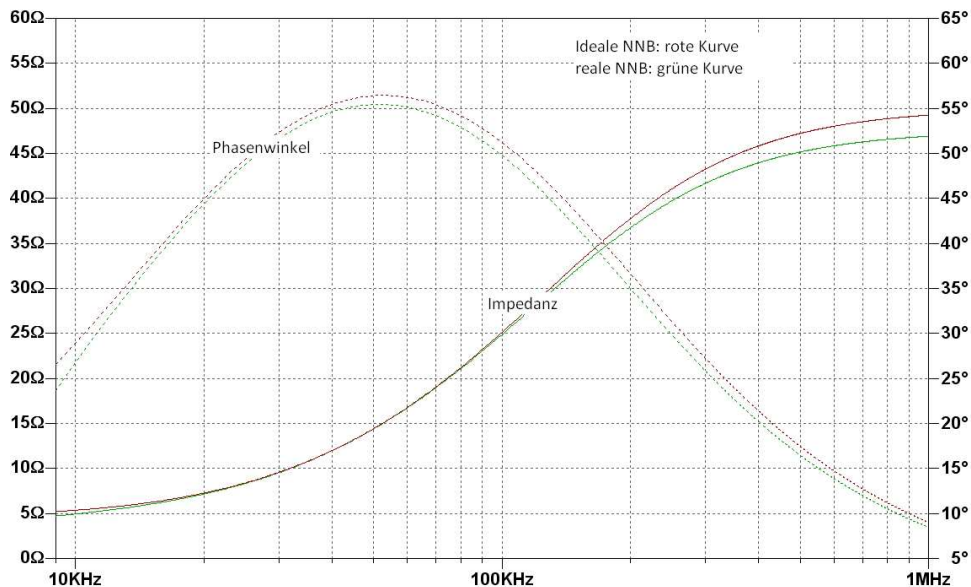


Zur Erfüllung dieser Aufgaben weist die in Bild 3 beispielhaft gezeigte Netznachbildung vom CISPR Typ 1 =  $50 \Omega / (50 \mu\text{H} + 5 \Omega)$  folgendes Schaltbild auf:



**Bild 3:** Beispielschaltung einer realen einfadigen Netznachbildung 9 kHz – 0,15 (30) MHz

Die in *Bild 3* gezeigte Beispielschaltung einer realen Netznachbildung zeigt gegenüber einer idealen folgendes Impedanzverhalten im Frequenzbereich bis 1 MHz:



**Bild 4:** Betrag  $|Z|$  und Phasenwinkel  $\varphi$  einer idealen (Bild 1) und einer realen Netznachbildung (Bild 3).



Die Abweichungen in Betrag und Phasenwinkel zwischen idealer und realer Netznachbildung sind erkennbar und dann nicht mehr vernachlässigbar, wenn Bauteiletoleranzen und unerwünschtes HF-Verhalten die Impedanz der realen Netznachbildung gegenüber der idealen negativ beeinflussen.



*Beispiel einer Netznachbildung für hohe Spannungen und Ströme Typ **NNB-4/350A**. Geeignet für Netzspannungen bis 1500 Volt (DC...63 Hz und 500 Ampere Spitzenstrom. Frequenzbereich 150 kHz – 30 MHz. Hochstromverschraubungen HSTV-16/500, 16mm-Standard. Diese Netznachbildung verfügt über 95 kHz Auskoppelfilter und einen integrierten Limiter zum Schutz des Messempfängereingangs.  
Hersteller: **Rolf Heine Hochfrequenztechnik, Ingolstadt.***

Die „reale“ Netznachbildung besteht, von links nach rechts wie in *Bild 3* dargestellt, aus folgenden drei Teilen:

### 1.2.1 Der Dämpfungskreis für Netznachbildungen vom Typ 1

Der Dämpfungskreis hat die Aufgabe, den Nachbildkreis der Netznachbildung von der Stromversorgung zu entkoppeln. Die Impedanz der Stromversorgung soll mit Hilfe des Dämpfungskreises die Impedanz des Nachbildkreises möglichst wenig beeinflussen und gleichzeitig soll der Dämpfungskreis Störungen aus dem Stromversorgungsnetz möglichst wirkungsvoll vom Prüfling und vom Auskoppelkreis fernhalten. Dazu wählt EN 55016-1-2 beispielhaft eine Tiefpassanordnung aus einer Induktivität von 250  $\mu\text{H}$  und einer Serienschaltung eines Ableitkondensators 10  $\mu\text{F}$  in Serie mit einem Widerstand 10  $\Omega$ . Der parallel zum 10  $\Omega$  Widerstand geschaltete Siebkondensator 0,22  $\mu\text{F}$  schließt den 10  $\Omega$  Widerstand für hohe Frequenzen fast kurz. So wird die Dämpfung von Störungen aus dem Stromversorgungsnetz für höhere Frequenzen weiter erhöht.

Forderungen aus EN 55016-1-2 für die Mindestentkopplung im Zuge vom Netzanschluss zum Messempfängeranschluss sind:

Nachbildwiderstand	Frequenzbereich	Mindestentkopplung
50 $\Omega$ / (50 $\mu\text{H}$ + 5 $\Omega$ )	0,009 – 0,15 MHz	0-40 dB, mit dem Logarithmus der Frequenz linear ansteigend
	0,15 – 30 MHz	40 dB
50 $\Omega$ / 50 $\mu\text{H}$	0,15 – 30 MHz	40 dB
50 $\Omega$ / (5 $\mu\text{H}$ + 1 $\Omega$ )	0,05 – 3 MHz	0-40 dB, mit dem Logarithmus der Frequenz linear ansteigend
	3 – 108 MHz	40 dB



**Hinweis:**

**Die geforderten Mindestentkopplungen sind ohne besondere schaltungstechnische Maßnahmen zur Filterung nicht zu erreichen.** Werden bei Entwicklung und Produktion an dieser Stelle Fehler gemacht, dann werden sich diese besonders nachteilig auf die Verifizierbarkeit von Messergebnissen auswirken. Gerade die Netzentkopplung, die durch den sachgemäßen Aufbau des Dämpfungsteils bestimmt wird, ist ein entscheidendes Detail im Hinblick auf die Brauchbarkeit von Netznachbildungen. Rückführbare Messungen sind bei zu geringer Netzentkopplung nicht möglich, weil die Unterscheidung Netzstörung / Prüflingsverhalten insbesondere bei nicht sauberen Stromversorgungsnetzen erschwert wird. Das ist der Grund für die anspruchsvollen Forderungen zur Unterdrückung von Netzstörungen durch EN 55016-1-2.



**Zweileiter-V-Netznachbildung NNB-2/16Z1.**

9 kHz bis 30 MHz, 2x16A. Diese NNB erfüllt die hohen Anforderungen aus der aktuellen EN 55016-1-2 für Full-Compliance-Messungen (werkskalibriert nach IEC 17025).  
**Hersteller: Rolf Heine Hochfrequenztechnik, Ingolstadt.**  
(OEM Metrix).

### 1.2.2 Der Nachbildkreis am Beispiel einer Netznachbildung vom Typ 1 (Bild 3)

Der Nachbildkreis bildet die genormte Impedanz der Netznachbildung gemäß EN 55016-1-2 für den Frequenzbereich 9-150 kHz nach. Die Impedanz für diesen Frequenzbereich beträgt:  $Z = 50\Omega \parallel (50\mu H + 5\Omega)$ . Der  $50\mu H + 5\Omega$  Anteil des Nachbildkreises wird durch einen 8 $\mu$ F Trennkondensator ergänzt, der notwendig ist, um den Strom aus der Stromversorgung nicht kurzzuschließen. Der 50  $\Omega$  Anteil des Nachbildkreises wird durch den Eingangswiderstand des Dämpfungsgliedes und der Impedanz des Messempfängers gebildet. Die Impedanz  $Z = 50\Omega \parallel (50\mu H + 5\Omega)$  „sieht“ folglich nur der Prüfling! Der Nachbildkreis erhöht zusätzlich noch einmal die Dämpfung von Störungen aus dem Stromversorgungsnetz und stabilisiert die Impedanz aus Sicht des Prüflings gegen die Stromversorgung.

### 1.2.2 Der Auskoppelkreis, beispielhaft für eine Netznachbildung vom Typ 1 (Bild 3)

Der Auskoppelkreis hat die Aufgabe, die leitungsgeführte Funkstörspannung, die der Prüfling erzeugt, an den Messempfänger zu führen. Dabei darf der Auskoppelkreis die Impedanz der Netznachbildung nicht unzulässig verändern. Der Auskoppelkreis beinhaltet gemäß CISPR 16-1-2 ein 20 dB Dämpfungsglied. Dieses Dämpfungsglied verhindert, dass eine eventuelle Abweichung des Innenwiderstands des Messempfängers von den genormten 50  $\Omega$  zu einer unzulässigen Verfälschung der Impedanz der Netznachbildung führt. Das 20 dB Dämpfungsglied erlaubt rechnerisch eine Anpassung der Messempfängerimpedanz von 40 dB. Damit ist die von CISPR 16 vorgegebene Anpassung > 20 dB immer gegeben. Aufgrund des hohen Dynamikbereichs und des niedrigen Rauschens der Eingangsstufen moderner Messempfänger, wirkt sich die Zusatzdämpfung durch das 20 dB Dämpfungsglied üblicherweise nicht nachteilig aus.



Im Auskoppelkreis einer Netznachbildung befindet sich meist ein Auskoppel-Hochpassfilter. Dieses Filter hat die Aufgabe, die Impedanz der Netznachbildung im unteren Frequenzbereich zu stabilisieren. Ein einfacher Auskoppelkondensator würde nur dann die Impedanz des Gesamtsystems nicht unzulässig verändern, wenn er in der Größenordnung von einigen Mikrofarad wäre. Mit einem derart großen Auskoppelkondensator würde am Messempfängerausgang eine beträchtliche Restspannung bei Speisung mit beispielsweise 230 V $\sim$  verbleiben, was zur Beschädigung des Messempfängers oder zu gefährlichen berührbaren Spannungen führen kann. Das Hochpassfilter hat als zweite Aufgabe die Filterung niederfrequenter Funkstörspannungen unterhalb der unteren Messgrenzfrequenz der Netznachbildung, die aufgrund ihres oft hohen Pegels zu Intermodulationsproblemen in den Eingangsstufen von Messempfängern führen können.



**Netznachbildung 50  $\Omega$  // 5 $\mu$ H für EMV-Messungen von Elektronik für Luft- und Raumfahrtanwendungen entsprechend der Luftfahrtnorm RTCA-DO/160.**

**Hersteller: Rolf Heine Hochfrequenztechnik, Ingolstadt (OEM Metrix)**

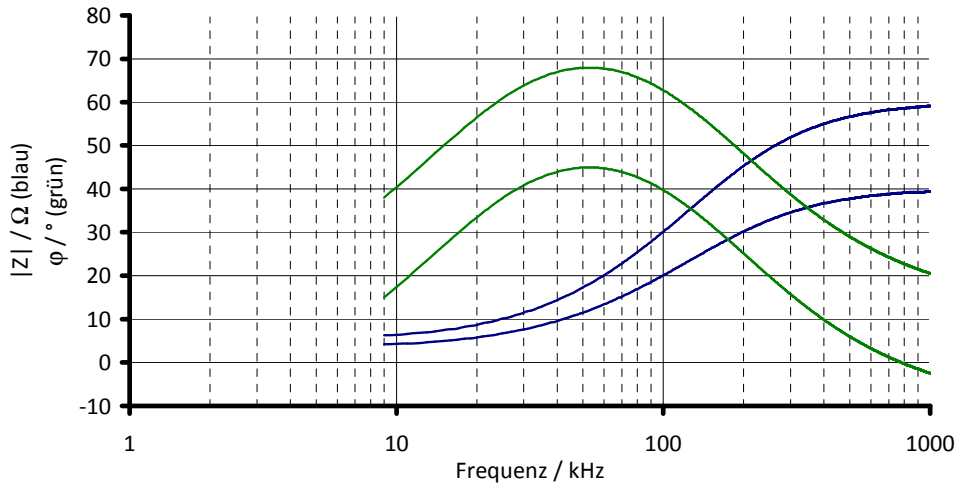
### **1.3 Zulässige Grenzabweichungen des Betrags $|Z|$ und des Phasenwinkels $\varphi$**

EN 55016-1-2 lässt für Betrag der Impedanz  $|Z|$  und Phasenwinkel  $\varphi$  Abweichungen zu. Für den Betrag der Impedanz beträgt die zulässige Grenzabweichung für alle drei Typen von Stromversorgungs-Netznachbildungen  $\pm 20\%$ . Die zulässige Grenzabweichung für die Phasenwinkel beträgt für alle drei Typen  $\pm 11,5^\circ$ . Die Grenzabweichung für die Phasenwinkel folgt aus der 20% Grenzabweichung für die Impedanz  $|Z|$ . Genaue Informationen und Begründung für die Einführung einer Grenzabweichung für den Phasenwinkel liefert Anhang I aus EN 55016-1-2:2004+A1:2005+A2:2006, Seite 80.

Die Abweichung für den Betrag der Impedanz  $|Z|$  darf 20% der Nominalimpedanz nicht überschreiten.



Die Grenzabweichungen für eine Netznachbildung vom Typ 1 für den Frequenzbereich 0,009 – 1 MHz sind in *Bild 5* graphisch dargestellt:



**Bild 5:**  
Grenzabweichungen für Betrag der Impedanz  $|Z|$  und Phasenwinkel  $\varphi$  einer Netznachbildung  $50 \Omega // (50 \mu\text{H} + 5 \Omega)$  für den Frequenzbereich 9 kHz – 1 MHz.

Die Messkurven von Impedanz und Phasenwinkel einer Netznachbildung (hier vom Typ 1) müssen innerhalb der in *Bild 5* dargestellten Grenzkurven verlaufen. Bei der Messung ist zu beachten, dass die Messtoleranz des Messaufbaus die Grenzabweichungen um den Betrag des Messfehlers verringert.

Hält eine Netznachbildung die Anforderungen an die frequenzabhängigen Phasenwinkel nicht ein, d.h. liegt der gemessene Phasenwinkel außerhalb der Grenzkurven, ist eine zusätzliche Fehlerberechnung für die betreffende Frequenz anhand des gemessenen Phasenwinkels durchzuführen.

Dipl.-Ing.(FH) Rolf Heine

[www.rolfheine.de](http://www.rolfheine.de)

Rolf Heine Hochfrequenztechnik e.K.

Bayernwerkstr. 16

85055 Ingolstadt

GERMANY

Tel.: +49 841 99395628 - Fax: +49 841 993 95 629